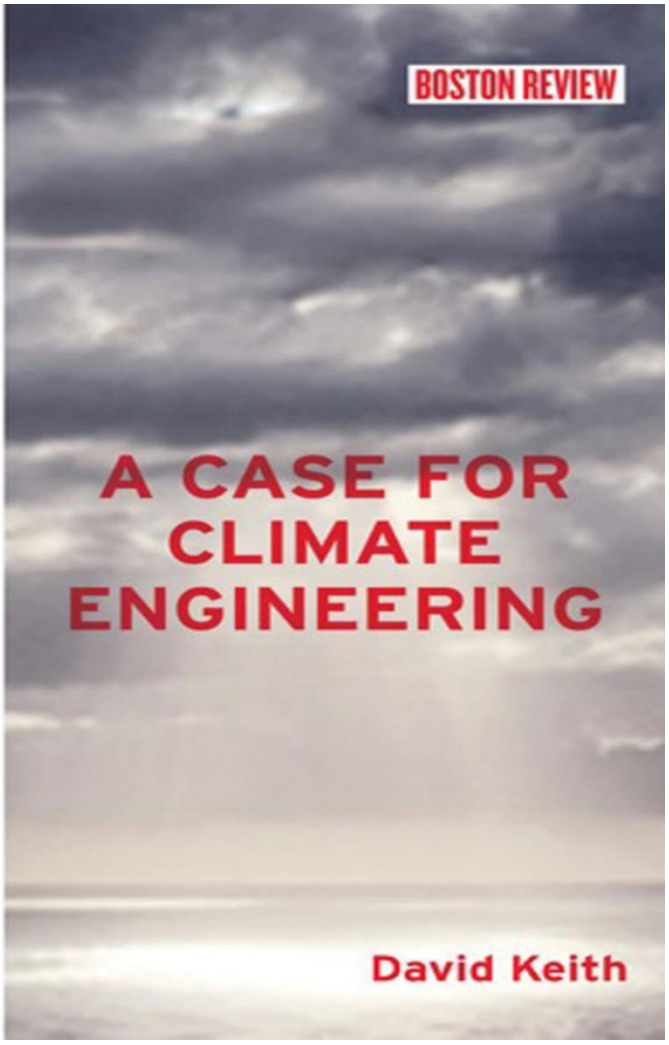

Nota del traductor (02-2022):

Mis estimados lectores, nuevamente publico una nueva traducción de este libro, el cual es muy interesante “Un Caso para la Ingeniería Climática” del autor David Keith.

Ustedes encontrarán al ir leyendo que el autor nos da una visión de lo que acontece en el mundo de hoy respecto al cambio climático del planeta.

Nos da una idea referente a este cambio y el cual se debe principalmente a dos causas fundamentales.

A) Emisiones de CO2 (Dióxido de carbono) antes conocido como anhídrido carbónico.
B) La geoingeniería (utilizada para contrarrestar el calentamiento debido a los rayos del sol)

El autor realiza un debate entre estos tópicos sin poder llegar de lleno a una solución concreta no porque no exista alguna, sino que está trabada en una serie de circunstancias humanas (morales) y técnicas (ingeniería bien encaminada y responsable)

Nos entrega una visión (autor) de que al tratar de dar solución al calentamiento global se debe usar la geoingeniería climática para contrarrestar el calentamiento por el gas dióxido de carbono, pero que ésta produce un efecto doble e interminable ya que puede mejorar la condición climática de una zona pero empeora ora en otro lugar cercano o lejano (al otro lado del mundo). **No existe un estudio responsable a nivel mundial de los efectos secundarios de la manipulación climática.** Pero se continúa con ello.

Nota 2 del traductor

¿Sabían ustedes de que prácticamente toda la industria alimenticia del planeta utiliza y depende del CO2 en sus diversos procesos alimenticios?

- En mataderos para aturdir a los animales antes de ser sacrificados
- En la conservación de las carnes y verduras
- En todas las gaseosas y en la fabricación de la cerveza
- En la extracción del petróleo

Nada más vayan a Wikipedia y verán que lo que les digo es verdad.

Entonces podemos hacernos la siguiente pregunta ¿son sólo las empresas que queman combustibles fósiles las que contaminan con CO2 el aire que respiramos? La respuesta en no.

¿Entonces cómo parar esta contaminación de CO2?

Es una difícil pregunta ya que hay enormes intereses creados por todos lados desde la industria del petróleo, automóviles y la industria alimentaria.

Es muy irónico que la avaricia humana y la inconciencia nos lleven a un camino sin salida, ya que de tomar decisiones concretas hoy los resultados se verán en décadas más adelante.

Entonces ¿cuál fue la solución más rápida y de bajo costo? Utilizar la geoingeniería para realizar el cambio climático y mejorar de este modo el clima en zonas que debido al calentamiento ya no llueve y por lo tanto las cosechas no se producen, pero esto trae un efecto dominó, cambias aquí y produces una daño o cambio dañino allá y así sucesivamente sin parar nunca.

El ser humano irresponsable ha llevado al planeta hasta esta situación la que tarde o temprano se arrepentirá ya que el planeta en sí puede compensar este desequilibrio mediante una reacción que aún desconocemos cuál podría ser.

Piensen además lo siguiente la próxima vez que vean al cielo un avión asperjando una estela de humo blanco tan larga tan larga que cubre prácticamente de horizonte a horizonte; esto es geoingeniería que no sólo se aplica al cambio climático sino que también como un mejorador en la conducción de ondas electromagnéticas de satélites y celulares, también como mejoramiento en la puntería de armas de cohetería y en la detección de otros fenómenos voladores.

En resumen les puedo decir que todo estos productos químicos van de apoco cayendo a la tierra, los respiramos caen en nuestros alimentos y aceleran el cambio climático tal vez con más fuerza que el mismo CO2.

Pienso humildemente que la única solución viable es plantar enormes cantidades de árboles, incluyendo las partes desérticas, utilizando tecnología limpia para ir extrayendo este CO2 del aire mientras la industria cambia sí o sí el empleo y la generación de este gas que ha sido sacado de la tierra y que la vegetación mediante la fotosíntesis lo vuelve a ella en forma inofensiva.

Mientras la codicia, desconfianza, avaricia humana imperen en el planeta, dar solución al problema anterior se puede decir que sería nulo.

Lean el libro, medítenlo y relean estas notas del traductor, para que juntos podamos resolver este asunto de orden planetario.

En www.scribd.com pueden encontrar otras traducciones de libros extremadamente interesantes como:

- La Guerra Contra los Débiles
- El Arcoiris Invisible
- Etc.

Un caso para la ingeniería climática

David Keith

Un libro de revisión de Boston

LA PRENSA DEL MIT Cambridge, Mass. Londres, Inglaterra

© 2013 Instituto de Tecnología de Massachusetts

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de este libro puede reproducirse de ninguna forma por ningún medio electrónico o mecánico (incluidas las fotocopias, las grabaciones o el almacenamiento y la recuperación de información) sin el permiso por escrito del editor.

Datos de catalogación en publicación de la Biblioteca del Congreso

Keith, David W.

Un caso para la ingeniería climática / David Keith.

pags. —(Libros de revisión de Boston)

Incluye referencias bibliográficas.

ISBN 978-0-262-01982-8 (tapa dura: papel alcalino)

ISBN 978-0-262-31779-5 (libro electrónico minorista)

1. Mitigación del cambio climático. 2. Calentamiento global—Prevención. 3. Ingeniería ambiental. 4. Ácido sulfúrico—Aspectos ambientales. 5. Geotecnología ambiental. 6. Política medioambiental. I. Título.

QC903.K45 2013

551.68—dc23

2013027459

10 9 8 7 6 5 4 3

Para Alex y Sarah, mi mejor esperanza para el futuro.

Contenido

Prefacio

1 Ingeniería del sol del mundo

2 Riesgo Climático

3 ciencia

4 Tecnología y Diseño

5 Ética y Política

6 Prospecto

Expresiones de gratitud

Notas

Sobre el Autor

Libros de revisión de Boston

Prefacio

Es posible enfriar el planeta inyectando partículas reflectantes de ácido sulfúrico en la atmósfera superior, donde dispersarían una pequeña fracción de la luz solar entrante de regreso al espacio, creando una delgada sombrilla para el suelo debajo. Decir que es "posible" subestima el caso: es barato y técnicamente fácil. Las aeronaves especializadas y los sistemas de dispersión necesarios para comenzar podrían implementarse en unos pocos años por el precio de un éxito de taquilla de Hollywood.

No abogo por un comienzo tan rápido y sucio de la ingeniería climática, ni espero una acción tan repentina, pero la ciencia subyacente es sólida y los avances tecnológicos son reales. Esta única tecnología podría aumentar la productividad de los ecosistemas en todo el planeta y detener el calentamiento global; podría aumentar el rendimiento de los cultivos, particularmente aquellos en las partes más cálidas y pobres del mundo. Es hiperbólico, pero no inexacto, llamarlo una herramienta barata que podría reverdecer el mundo.

La geoingeniería solar es un conjunto de tecnologías emergentes para manipular el clima. Estas tecnologías podrían contrarrestar parcialmente el cambio climático provocado por la acumulación paulatina de dióxido de carbono. Agregar deliberadamente un contaminante para contrarrestar temporalmente a otro es una solución técnica brutalmente fea, pero esa es la esencia de la sugerencia de que se inyecte azufre en la estratosfera para limitar el daño causado por el carbono que hemos bombeado al aire.

La geoingeniería solar es una herramienta extraordinariamente poderosa. Pero también es peligroso. Implica nuevos riesgos ambientales. Y, al igual que el cambio climático en sí mismo,

sus efectos son desiguales, por lo que incluso si mejora la situación de muchos agricultores, la de otros empeorará. Es tan barato que casi cualquier nación podría darse el lujo de alterar el clima de la tierra, un hecho que puede acelerar el equilibrio cambiante del poder global, generando preocupaciones de seguridad que podrían, en el peor de los casos, conducir a la guerra. Si se usa mal, la geoingeniería podría impulsar un cambio climático extraordinariamente rápido, poniendo en peligro el suministro mundial de alimentos. A la larga, el control estable de la geoingeniería puede requerir nuevas formas de gobernanza global y puede resultar tan perjudicial para el orden político del siglo XXI como lo fueron las armas nucleares para el siglo XX.

Mucha gente siente una repugnancia visceral al escuchar por primera vez sobre la geoingeniería. Para algunos, la repugnancia cristaliza en ultraje moral ante la sola idea de que se esté discutiendo el tema; para otros, la exposición al debate sobre la geoingeniería trae consigo una apreciación de las decisiones difíciles en sus raíces y una comprensión de que existen argumentos creíbles a favor y en contra. Esa repulsión intuitiva me parece saludable; nuestra cultura obsesionada con los artilugios se ve atraída con demasiada facilidad por una solución tecnológica nueva y brillante. Un enfoque estrecho en el poder de una tecnología nos ciega con demasiada facilidad a sus riesgos.

Es tentador desear que desaparezca el cambio climático negando la ciencia o afirmando que un cambio rápido a nuevas fuentes de energía limpia proporciona una salida fácil. Pero no hay una bala mágica. No podemos tomar decisiones acertadas suponiendo que el mundo es como nos gustaría que fuera: la ciencia del riesgo climático es sólida y la inercia del ciclo del carbono combinada con la de la economía mundial significa que los esfuerzos para reducir las emisiones solo pueden moderar (pero no invertir) el cambio climático durante este siglo.

Al igual que con la capacidad de diseñar nuestro propio genoma, la humanidad está desarrollando rápidamente la capacidad de diseñar el entorno planetario.

El poderoso potencial de la geoingeniería exige un amplio debate que debe incluir no solo argumentos creíbles a favor y en contra de tal intervención, sino también, como con la ingeniería genética, una apreciación de las grandes preguntas que plantea sobre la naturaleza y la tecnología a escala planetaria.

Yo mismo he llegado a la conclusión de que tiene sentido moverse con prisa deliberada hacia el despliegue de la geoingeniería. Usted bien puede llegar a una conclusión diferente. Mi objetivo es simplemente convencerte de que es una elección difícil.

* * *

En este libro, intento ofrecer una visión sinóptica de la geoingeniería solar para personas educadas no especialistas que estén dispuestas a abrirse camino a través de algunos argumentos complejos. No soy un espectador desinteresado. La historia de cada autor está determinada por sus prejuicios. El resto de este prefacio revela algunos de los míos.

El desierto ha dado forma a mi vida. Desde viajes de fin de semana en canoa hasta largas expediciones de esquí en solitario en el alto Ártico, tengo la suerte de haber pasado alrededor de un año de mi vida viajando por las grandes tierras salvajes lejos de las carreteras. Mi pensamiento fue moldeado por un interés familiar en la protección del medio ambiente; mi padre desempeñó un papel temprano en la ciencia y la regulación del DDT (Dicloro difenil tricloroetano), y su hermano ayudó a liderar la creación de la observación de aves como una actividad social separada de la ornitología científica. Soy un ecologista excéntrico: un poco paleto liberal tal vez, ya que he participado en Earth First (La Tierra Primero) acciones y recuentos de las aves Navidad, pero tengo un congelador lleno de venado bura del otoño pasado. También soy un manitas y un tecnófilo. Desde tener suerte en un trabajo en un laboratorio de física láser superior en la escuela secundaria, aprender a soldar con oxiacetileno mientras reconstruía el marco oxidado de mi primer automóvil y luego ganar un premio al mejor doctorado en física experimental en el MIT. Siempre me encantó ensuciarme las manos con las herramientas. Alejándome de la física porque no parecía involucrar problemas del mundo real, comencé a trabajar en clima y energía antes de terminar la escuela de posgrado. En 1989 me topé con la geoingeniería. Me atrajo la falta de análisis de alta calidad de la tecnología o las implicaciones políticas, una falta que parecía extraña dada la importancia potencial de la geoingeniería para el futuro del clima.

He trabajado en este tema durante la mayor parte de mi carrera académica. Si bien mi escritura académica apunta a la objetividad y el desapasionamiento, aquí aventuro conjeturas fundamentadas que van más allá de lo que se puede defender en un trabajo de investigación académica. Si bien apunto a la objetividad, no escondo mis puntos de vista personales. He hecho lo mejor que he podido para distinguir claramente mi juicio sobre cuáles son los hechos de mis juicios personales, cargados de valores, sobre lo que deberíamos hacer.

Mi pasión por este tema tiene sus raíces en la preocupación de que el ambientalismo ha perdido su rumbo. El lenguaje de la defensa del medio ambiente se ha vuelto cada vez más tecnocrático. Los llamados a la acción se basan casi exclusivamente en medidas cuantitativas (aparentemente) objetivas de costo y beneficio que equivalen a una cruda apelación al interés propio. Se nos insta a proteger los paisajes naturales no porque caminar por ellos brinde placer, sino por los servicios ecosistémicos que brindan, servicios como el oxígeno y el agua limpia. Estos argumentos tienen mérito, pero creo que oscurecen gran parte de lo que realmente impulsa las elecciones de las personas. Si estamos protegiendo una selva tropical porque almacena carbono o produce medicamentos maravillosos, entonces deberíamos estar felices de talar el bosque si alguna máquina de almacenamiento de carbono o un laboratorio de biotecnología molecular pueden proporcionar algo mejor estos servicios. Si estamos protegiendo un humedal por su capacidad para retener y purificar el agua, entonces deberíamos estar felices de reemplazarlo con un desarrollo de vivienda si ese desarrollo incluye tecnologías para el almacenamiento y la filtración de agua que hacen estos trabajos mejor que el humedal. Para mí, los beneficios utilitarios de la naturaleza son una medida groseramente insuficiente de su valor.

También me preocupa que el debate sobre el cambio climático haya degenerado en una guerra de trincheras en la que los argumentos son cada vez más extremos con afirmaciones de que la ciencia del clima es un fraude lucrativo contrarrestado por afirmaciones de que las emisiones de carbono representan una amenaza existencial inmediata. A medida que los extremos se atrincheran, la batalla se ha estancado de modo que ahora oscurece muchos de los hechos y valores morales en la raíz de nuestras elecciones. Para mí, la geoingeniería es importante tanto por derecho propio como porque nos anima a repensar algunas de nuestras suposiciones fundamentales sobre los medios y fines de la política climática.

Un amor difuso por la naturaleza es indiscutible. Estamos saturados de imágenes ambientales de enfoque suave. Las exhortaciones ecológicas se han convertido en ruido blanco al mismo tiempo que las nuevas tecnologías sociales han acelerado el declive de la experiencia cotidiana de las personas con el mundo natural. Sospecho que Edward O. Wilson, el entomólogo y escritor, captó más de una pizca de verdad con su hipótesis de la biofilia, la idea de que los humanos tienen un impulso innato de afiliarse a otras formas de vida. Para mí, el desafío es elaborar una ética ambiental que reconozca valores no utilitarios en el mundo natural sin afirmar que estos valores prevalezcan sobre todos los demás y sin hacer afirmaciones ingenuas de una clara distinción entre naturaleza y civilización.

Los seres humanos han dado forma al mundo natural desde mucho antes de la era industrial, incluso antes de la invención de la agricultura. Los cazadores de la Edad de Piedra exterminaron animales grandes en cada nueva tierra a la que ingresaron y el impacto de estas extinciones se extendió por todo el paisaje. Cuando los humanos llegaron a Australia hace unos cincuenta mil años, por citar solo un ejemplo, la presión de la caza llevó a la extinción a aproximadamente el 90 % de todas las especies que pesaban más que un humano típico.1

El reconocimiento del papel de la humanidad en la configuración de paisajes que parecen "naturales" no les resta valor ni los convierte en un artefacto, para mí. Todo lo contrario; en parte, su valor radica en la historia de cómo llegaron a ser como son, la coevolución de la naturaleza, la cultura y la tecnología. En Rambunctious Garden, Emma Maris argumentó que los ecologistas deberían abandonar la obsesiva defensa de la naturaleza prístina en favor de una expansión ética ambiental que abraza la realidad desordenada pero vibrante de los paisajes moldeados por la acción humana.

Los argumentos de Maris me persuaden y me repelen simultáneamente, pero estoy convencido de que no podemos llegar a conclusiones sensatas sobre los méritos de la geoingeniería o sobre la política climática en sí misma sin abordar estas difíciles cuestiones en la interfaz de la sociedad y la naturaleza.

Una nota sobre la terminología

La geoingeniería solar, también conocida como gestión de la radiación solar (SRM), es el único tema de este libro. Pero el término geoingeniería también describe la eliminación de dióxido de carbono de la atmósfera, a menudo llamada eliminación de dióxido de carbono (CDR). Antes de

profundizar en la geoingeniería solar, vale la pena un desvío para explorar las diferencias entre estas dos clases de tecnología.

Hay muchas formas de eliminar el dióxido de carbono del aire, desde aumentar las existencias de carbono en los suelos y bosques a medida que los agricultores y silvicultores cambian sus prácticas de gestión hasta métodos de ingeniería que podrían acelerar el ciclo de meteorización geológica en el que la disolución de los minerales alcalinos en el agua de mar extrae carbono de la atmósfera hacia el océano.

La tecnología para la captura directa de dióxido de carbono del aire también podría desempeñar un papel. Carbon Engineering, una empresa que fundé, está desarrollando dicha tecnología, aunque nuestro trabajo tiene como objetivo permitir combustibles bajos en carbono. (Me refiero a los conflictos de intereses que esto plantea en la siguiente nota).

La geoingeniería solar y las tecnologías de eliminación de carbono son herramientas de nuestro kit para gestionar el riesgo climático, un conjunto de herramientas que incluye: consumir menos (conservación), brindar los mismos servicios con menos insumos de energía (eficiencia), suministrar energía con menos carbono (descarbonización), eliminar carbono después de su emisión (eliminación de carbono), la ingeniería del cambio climático a un nivel determinado de gases de efecto invernadero (geoingeniería solar) y, finalmente, la reducción de los impactos del cambio climático mediante la adopción de medidas adicionales para adaptarse a medida que cambia (adaptación).

Una última palabra sobre la jerga de la política climática: cualquier cosa que reduzca las emisiones de gases de efecto invernadero por debajo de lo que habrían sido en algún entorno mítico en el mundo de negocios como de costumbre se llama mitigación. Por lo tanto, la mitigación incluye la conservación, la eficiencia y la descarbonización.

La geoingeniería solar y la eliminación de carbono proporcionan un medio para gestionar el riesgo climático y, a veces, cada una se denomina geoingeniería, pero solo están un poco más relacionadas entre sí que cualquiera de ellas con otras herramientas en la caja de herramientas. Primero, son totalmente distintos con respecto a la ciencia y la tecnología requeridas para desarrollarlos, probarlos y desplegarlos. Y segundo, distribuyen los costos y los riesgos de manera muy diferente. La geoingeniería solar tiene costos de implementación insignificantes e implica beneficios y riesgos que son de escala regional a global. Las tecnologías de eliminación de carbono tienen costos que son generalmente similares a la mitigación, en el sentido de que podría costar alrededor de cien dólares eliminar una tonelada de dióxido de carbono utilizando tecnologías que aceleran el ciclo de erosión y aproximadamente la misma cantidad evitar una tonelada de emisiones mediante la construcción de turbinas eólicas para reemplazar la electricidad de combustibles fósiles. Al igual que la mitigación, tienen riesgos locales en el punto de uso que deben intercambiarse por beneficios globales (pero no locales) sin riesgos globales correspondientes.

Esta divergencia de costos y riesgos significa que los desafíos que plantean la geoingeniería solar y la eliminación de carbono para las políticas y la gobernanza son casi completamente diferentes. La eliminación de carbono es como la mitigación en el sentido de que requiere incentivos políticos para equilibrar el costo y el riesgo local frente a un beneficio global que se acumula en un futuro lejano (como veremos cuando exploremos la inercia del ciclo del carbono). De hecho, hasta que las emisiones netas de la humanidad sean cero, cualquier método de

eliminación de carbono tiene precisamente el mismo efecto sobre el clima que la mitigación: una tonelada no emitida es lo mismo que una tonelada emitida y recapturada. Debido a que la geoingeniería solar y la eliminación de carbono tienen poco en común, tendremos una mejor oportunidad de elaborar una política sensata si los tratamos por separado.

2. En el resto de este libro, utilizaré la geoingeniería para describir únicamente la geoingeniería solar.

Una nota final sobre el dinero y el conflicto de intereses:

Mi trabajo en geoingeniería solar ha sido financiado por becas de investigación académica y por una subvención personal de Bill Gates para quien actúo como asesor informal ocasional sobre cambio climático y tecnologías energéticas. Todo mi trabajo sobre este tema es académico con publicación abierta y sin patentes.

También tengo las manos sucias al dirigir Carbon Engineering, una pequeña empresa emergente que está desarrollando tecnología para la captura directa de dióxido de carbono de la atmósfera. Esperamos que esta tecnología haga que sea más barato reducir las emisiones de carbono de partes de la infraestructura de transporte, como los aviones, que de otro modo serían difíciles de descarbonizar, y nos vemos compitiendo con otras formas de lograr este objetivo, como los biocombustibles.

Veo una clara distinción en el papel de la empresa privada en la geoingeniería solar y la eliminación de carbono. El desarrollo de tecnologías de geoingeniería solar debe ser lo más público y transparente posible. El extraordinario poder global de estas tecnologías significa que no pueden ser gobernadas efectivamente por las reglas locales apropiadas para la tecnología más convencional. Creo que el desarrollo privado con fines de lucro (y las patentes) de las tecnologías centrales para la geoingeniería solar deben desaconsejarse enérgicamente.

La captura directa de carbono de la atmósfera es muy diferente. Tenga éxito o fracase, la tecnología que estamos desarrollando en Carbon Engineering es un proceso industrial contenido con riesgos locales similares a otras tecnologías industriales de procesamiento de energía o minerales. Nuestro trabajo en Carbon Engineering es desarrollar una tecnología pero no decidir cómo o si se usa. Debido a mi participación, no pretendo hablar como académico sobre la captura de carbono del aire. 3 Los gobiernos deben regular esto para el bien público lo cual es erróneo para las corporaciones (¡Que no son personas!) que tienen derecho preferente en este rol regulador.

1

Ingeniería del sol del mundo

¿Cómo podría funcionar la geoingeniería? Supongamos que el objetivo era reducir la tasa de calentamiento global a la mitad a partir de 2020 poniendo ácido sulfúrico en la estratosfera. Si se combina con esfuerzos serios para reducir las emisiones, esto es, en mi opinión, un escenario plausible para gestionar los riesgos humanos y ecológicos del cambio climático en un mundo sin política. Es factible en el estrecho sentido tecnocrático de que un programa bien administrado probablemente podría estar listo para comenzar en 2020 si se le da un visto bueno provisional hoy y un presupuesto total de aproximadamente de mil millones de dólares.

Este escenario es una herramienta con la que podemos explorar lo posible. No es una predicción o un plan. Hay un puñado de tecnologías de geoingeniería plausibles y una gran cantidad de formas en que podrían usarse, incluidas algunas que son inmensamente destructivas. Como idea emergente y divisiva, la geoingeniería se sumará a la confusión de la política climática. Aunque espero convencerlos de que es una buena idea en el sentido de que podría aprobarse e implementarse rápidamente en una democracia global ideal, la posibilidad de comenzar este escenario para 2020 parece escasa. Carecemos de las herramientas sociales para tomar decisiones colectivas sólidas sobre la gestión planetaria. Exploraré las políticas que pueden dar forma a los resultados del mundo real más adelante en este libro.

Para que sea efectivo, el ácido sulfúrico debe estar en pequeñas gotas de agua, aproximadamente mil veces más pequeñas que el ancho de un cabello humano, y debe colocarse en la estratosfera a unos 20 kilómetros sobre la superficie de la tierra. Una vez allí, las gotas dispersarán la luz solar de regreso al espacio, reduciendo la cantidad de luz solar que llega al suelo. Este ligero efecto de sombreado tiende a enfriar el planeta, compensando parcialmente el efecto de calentamiento de los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono. Las gotas de agua harían un buen trabajo dispersando la luz del sol (cualquier nube lo hace), pero simplemente no viven lo suficiente en el aire seco de la estratosfera. La razón para usar ácido sulfúrico es simplemente evitar que las gotas se evaporen. Una vez formado el ácido las gotas permanecen en la estratosfera durante aproximadamente un año antes de caer a la atmósfera inferior, por lo que deben reponerse continuamente.

A medida que el dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero se acumulan en la atmósfera, y se acumularán hasta que la humanidad reduzca sus emisiones a casi cero: la cantidad de azufre necesaria para compensar su calentamiento crece año tras año. Después del primer año de operación, el proyecto tendría que inyectar unas 25 mil toneladas de azufre al año para compensar la mitad de ese crecimiento del año en el calentamiento debido a la acumulación de ese año de gases de efecto invernadero. El próximo año se necesitarían 50 mil toneladas para proveer el suficiente enfriamiento para compensar la mitad del calentamiento de dos años de crecimiento por la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero. En 2030, después de una década de operación, la tasa de inyección tendría que ser de 250 mil toneladas por año4.

No es técnicamente difícil llevar sulfatos a la estratosfera. Las herramientas para hacer esto no existen hoy en día, pero es justo decir que la capacidad existe hoy en día en el sentido de que muchas compañías aeroespaciales o gobiernos podrían diseñar y construir la aeronave y la tecnología de dispersión requeridas en unos pocos años. El desafío técnico no son las herramientas de dispersión de azufre, sino el desarrollo de herramientas científicas y de observación para monitorear la efectividad y los efectos secundarios de un programa de geoingeniería de sulfato, pero aquí también hay muchas herramientas que podrían aplicarse rápidamente.

La inyección de sulfatos podría lograrse utilizando jets comerciales Gulfstream equipados con motores a reacción de derivación baja listos para usar para permitirles volar a altitudes de más de sesenta mil pies junto con las herramientas necesarias para generar y dispersar el ácido sulfúrico. Solo se necesitarían uno o dos aviones para iniciar el programa, y después de una década se necesitarían unos diez aviones para levantar las 250 mil toneladas requeridas cada año a un costo anual de unos 700 millones de dólares. Entonces tendría sentido convertirlos en aviones especialmente diseñados con alas más largas que se adapten mejor a los vuelos a gran altitud; este cambio reduciría los costos aproximadamente a la mitad y podría permitir la distribución global de sulfato desde dos aeródromos.5

En 2070, después de medio siglo de operación, el programa tendría que estar inyectando un poco más de un millón de toneladas por año utilizando una flota de cien aviones, aunque para ese momento podría tener sentido haber cambiado de ácido sulfúrico a unas partículas diseñadas con menos impactos ambientales.

Los sulfatos en la estratosfera ciertamente no son la mejor tecnología posible, pero bajo el escenario de rampa lenta descrito aquí, habría mucho tiempo para desarrollar alternativas antes de que los problemas con los sulfatos se vuelvan demasiado severos.

Puede encontrar este escenario intrigante o loco, pero es difícil argumentar que es técnicamente inviable. Las herramientas necesarias podrían estar listas para 2020, e incluso después de medio siglo, el costo directo del programa sería menos del uno por ciento de lo que gastamos ahora en el desarrollo de energía limpia.

¿Qué tan bien funcionaría? ¿Cuáles son los riesgos? Estas preguntas son un enfoque central de este libro, así que considere lo siguiente como un adelanto. No hay duda razonable de que los aerosoles de sulfato podrían usarse para reducir la tasa promedio de calentamiento global a la mitad durante el próximo medio siglo. Pero el dióxido de carbono no es un simple termostato. La acumulación de dióxido de carbono calienta la mayor parte del mundo la mayor parte del tiempo, pero su efecto no es uniforme. El calentamiento será, por ejemplo, más fuerte en las regiones polares que cerca del ecuador. El cambio climático no es solo calentamiento: las lluvias aumentarán y serán más intensas, y algunas regiones se secarán mientras que otras se volverán más húmedas. Y la huella de carbono se extiende más allá del clima. Acidificará los océanos y fertilizará el crecimiento de algunas plantas, y aquí nuevamente los efectos serán desiguales.

La adición de sulfatos a la estratosfera no hace nada para detener la acidificación de los océanos y no puede compensar perfectamente los cambios climáticos multidimensionales producidos por los gases de efecto invernadero. Pero hay pruebas muy sólidas de que puede reducir sustancialmente muchos de los cambios climáticos más importantes y sus riesgos asociados. La geoingeniería no solo modera el aumento de la temperatura media mundial; puede reducir sustancialmente los cambios tanto en la precipitación como en la temperatura región por región. Podría usarse para detener o incluso revertir la pérdida de hielo marino del Ártico.6

Si bien se puede decir con razonable confianza que la geoingeniería podría reducir muchos de los aspectos físicos a gran escala del cambio climático, se sabe menos sobre su capacidad para reducir los impactos humanos, los efectos colaterales del cambio climático que son de mayor preocupación. Sólo unos pocos estudios han examinado su eficacia para limitar los impactos del clima en la agricultura, por ejemplo, pero estos estudios han encontrado que la geoingeniería probablemente puede reducir al menos algunas de las pérdidas de cultivos que son un resultado previsto del cambio climático para que la productividad de los cultivos en algunas de las regiones más calurosas y más pobres del mundo sea mayor con una cantidad adecuada de geoingeniería de lo que serían con la misma cantidad de gases de invernadero pero sin geoingeniería.

Las pérdidas de cosechas, el estrés por calor y las inundaciones son los impactos del cambio climático que probablemente afectarán más duramente a los más pobres del mundo. Es probable que las cantidades moderadas de geoingeniería contempladas en este escenario de rampa lenta reduzcan cada uno de estos impactos durante el próximo medio siglo y, por lo tanto, beneficiarán a los pobres y los políticamente desfavorecidos que son los más vulnerables al rápido cambio ambiental.

Este potencial para reducir el riesgo climático es la razón por la que tomo en serio la geoingeniería. Este potencial es incierto, pero las estimaciones de los impactos del cambio climático son en sí mismas inciertas, y estas dos incertidumbres están estrechamente vinculadas porque la ciencia de la que dependemos para predecir los riesgos de acumular carbono en la atmósfera es, en buena medida, el mismo cuerpo de ciencia que constituye la base para comprender el potencial de la geoingeniería. Los riesgos también son reales. La inyección de sulfatos en la estratosfera probablemente aumentará el daño a la capa de ozono y, cuando las partículas de sulfato desciendan a la atmósfera inferior, contribuirán a la contaminación del aire.

Cualquier cambio climático será malo para algunas regiones y grupos mientras beneficia a otros. Esto es cierto tanto para el calentamiento impulsado por el carbono como para el enfriamiento impulsado por el sulfato. La mejor conjetura es que la geoingeniería reducirá el daño del cambio climático en la mayoría de las regiones, pero incluso en el mejor de los casos, la geoingeniería empeorará la situación de algunas regiones, tal vez aumentando la sequía. Por lo tanto, el riesgo es que la capacidad de los sulfatos, u otros métodos de geoingeniería solar, para limitar el cambio climático regional sea menor de lo que predicen los modelos, por lo que los daños serán mayores.

Nuestro conocimiento de los riesgos no es puramente teórico. La experiencia del mundo real da confianza de que esos riesgos pueden ser entendidos. Para comprender el riesgo de inyectar un millón de toneladas anuales de azufre a la atmósfera, por ejemplo, podemos estudiar la erupción del Monte Pinatubo en 1991, que lanzó ocho millones de toneladas de azufre a la estratosfera. Y cada año, los humanos lanzan aproximadamente cincuenta millones de toneladas de azufre a la atmósfera como contaminación del aire. Este no es un argumento para que debamos ignorar el riesgo de poner un millón de toneladas de azufre por año en la estratosfera para la geoingeniería, pero debería dar confianza en que existe una fuerte base empírica sobre la cual evaluar estos riesgos, y es una razón para esperar que los riesgos serán comparativamente pequeños.

No estamos saltando a lo desconocido con un producto químico totalmente nuevo.

Los riesgos tampoco son irreversibles como, por ejemplo, liberar una especie con nuevos genes manipulados. Los sulfatos no se reproducen. Si dejas de inyectarlos desaparecerán de la estratosfera en unos años.

Aun así, es posible que piense que los riesgos son demasiado grandes y los beneficios demasiado inciertos para justificar un compromiso con la geoingeniería. Estoy de acuerdo. Doblemente porque existe un escaso registro de análisis serios de la geoingeniería, y mucho de lo que está disponible ha sido realizado por un pequeño grupo de científicos (yo soy uno de ellos), un grupo apodado "geo-camarilla" por el escritor científico Eli Kintisch en Hack the Planet. El peligro del pensamiento grupal es real.

De hecho, si nos enfrentáramos a una elección única entre hacer un compromiso total con un programa de geoingeniería para compensar todo el calentamiento y abandonar la geoingeniería para siempre, elegiría el abandono. Pero esta no es la elección que enfrentamos. Nuestra elección es entre lo que está pasando, casi sin investigación organizada sobre el tema, y el compromiso con un programa de investigación serio que desarrollará la capacidad de geoingeniería, mejorará la comprensión de los riesgos y beneficios de la tecnología y abrirá la comunidad de investigación para diluir la geo- camarilla. Dada esta opción, elijo la investigación; y si la investigación respalda las primeras promesas de la geoingeniería, entonces elegiría la implementación gradual.

Los riesgos y beneficios de la geoingeniería no son simplemente una propiedad objetiva de la tecnología; dependen de la forma en que se usa. El escenario que propongo parte del compromiso total en dos aspectos cruciales. En primer lugar, supone un aumento lento de la

carga de sulfato, lo que nos brinda una mejor oportunidad de ver los problemas y solucionarlos o detener la inyección de sulfato antes de que se conviertan en desastres. En segundo lugar, su objetivo sería compensar solo la mitad del calentamiento. Esto es importante porque, como veremos, si usa suficiente sulfato para cancelar todo el calentamiento, disminuye la precipitación global y aumenta el riesgo de varios efectos secundarios dañinos. El uso de la geoingeniería para compensar solo la mitad del calentamiento inclina la balanza lejos de los riesgos y hacia los beneficios. Compensar solo la mitad del calentamiento también tiene la ventaja de preservar un incentivo directo para reducir las emisiones, un factor que considero crucial para cualquier política climática sensata.

Los críticos afirmarán que estoy exagerando la geoingeniería, y sus preocupaciones probablemente girarán en torno a tres cuestiones legítimas. El primero es un desacuerdo real sobre la ciencia. Algunos podrían argumentar que en un esfuerzo por superar lo que veo como un escepticismo exagerado de la geoingeniería, puedo exagerar los beneficios y subestimar los riesgos. El segundo refleja supuestos sobre cómo se utilizará. Por conveniencia o tal vez por prejuicio, la mayoría de los estudios de modelos climáticos de geoingeniería simulan en efecto el caso de compromiso total en el que se utiliza para compensar todo el calentamiento, exagerando los riesgos en comparación con la implementación más restringida que exploro aquí. La preocupación final se refiere al uso indebido, incluida la idea de que la geoingeniería se convertiría en un sustituto de los esfuerzos para reducir las emisiones.

Comparto este miedo. De hecho, veo el uso indebido de la geoingeniería en un mundo multipolar caótico como el riesgo más grave con diferencia.

Si la geoingeniería es nuestra única estrategia, si seguimos emitiendo dióxido de carbono para que se siga acumulando en la atmósfera, tendríamos que aumentar continuamente la cantidad de geoingeniería solar con (eventualmente) consecuencias desastrosas. Pero este hecho simplemente significa que debemos (eventualmente) dejar de emitir gases de efecto invernadero. No significa que uno deba abandonar prematuramente una herramienta potencialmente útil para limitar sus impactos solo porque también tiene límites. Me referiré a las implicaciones sociales de la geoingeniería más adelante, pero aquí exploro las ventajas y desventajas básicas de riesgo-beneficio en un mundo en el que no se implementaría incorrectamente para evitar reducir las emisiones.

La geoingeniería complementa la reducción de emisiones. Reducir las emisiones reduce el riesgo a largo plazo al detener la acumulación de carbono, mientras que la geoingeniería, si funciona como se espera, enmascarará los riesgos a corto plazo (en el lento mundo del carbono y el clima, el corto plazo significa el próximo medio siglo).). Pero la geoingeniería no puede eliminar el riesgo subyacente que surge de la rápida (en el tiempo geológico) transferencia de carbono de la humanidad desde los depósitos subterráneos a la atmósfera. Es difícil exagerar la importancia de la capacidad de la geoingeniería para reducir el riesgo para las generaciones actuales, ya que no existen otros métodos que puedan reducir estos riesgos de manera significativa en el próximo medio siglo.

Cuando se usa junto con los recortes de emisiones, la geoingeniería puede reducir el riesgo sin necesidad de realizar la geoingeniería para siempre. Supongamos que las emisiones se redujeran de manera constante hasta llegar a cero en 2070, lo que provocaría que el clima se calentara hasta la última parte del siglo y luego se mantuviera cálido durante muchos siglos después de eso. Si la geoingeniería se incrementara lentamente hasta 2070 y luego se redujera durante el siguiente medio siglo para detenerse en 2120, el efecto neto sería distribuir la misma cantidad de calentamiento durante un siglo completo, reduciendo la tasa de calentamiento a la mitad. Debido a que muchos impactos climáticos son muy sensibles a la tasa de calentamiento, esto podría brindar un gran beneficio aunque no cambie la cantidad total de calentamiento durante el siglo.

La idea de que la geoingeniería podría ser temporal es polémica.

Críticos prominentes como el geofísico Ray Pierrehumbert han afirmado que, una vez iniciada, la geoingeniería debe continuar para siempre, concluyendo que, por lo tanto, toda la idea es "una locura". A pesar de las fuertes afirmaciones, no parece haber un argumento basado en la física para respaldar la opinión de que una vez iniciada la geoingeniería no se puede detener, particularmente en el caso en el que se aumenta y luego disminuye lentamente.7 Hasta hace poco, la controversia en torno a la geoingeniería ha sido suprimida. La falta de investigación, a su vez, genera controversia porque permite que las afirmaciones exageradas sobre los beneficios y los riesgos no sean cuestionadas. La teoría es siempre un terreno más fértil para el extremismo que el suelo desordenado de la realidad. Sostengo que las ventajas potenciales de la geoingeniería son lo suficientemente grandes como para justificar un compromiso inmediato con un programa de investigación internacional serio que incluya experimentos al aire libre a pequeña escala. La investigación puede mostrar que estas tecnologías no funcionarán, pero cuanto antes lo descubramos, mejor. Si la investigación confirma la promesa inicial de la geoingeniería, entonces tenemos la opción de comenzar la implementación gradual si existe la voluntad política, o la necesidad.

2

Riesgo Climático

James Hansen, el científico climático convertido en activista más visible del mundo, ha dicho que debemos detener el desarrollo de las arenas bituminosas canadienses, una fuente creciente de producción de petróleo con uso intensivo de energía, o de lo contrario, "se acabó el juego para

el planeta".8 Comparto lo de Hansen que se opone al desarrollo de las arenas bituminosas, pero no veo ninguna base científica para hacer tales afirmaciones de muerte inminente.

Las predicciones de catástrofes son más que florituras retóricas. Apelan a preocupaciones ampliamente compartidas de que la civilización industrial ha perdido el rumbo, temores milenarios de que el consumo excesivo nos está llevando a un apocalipsis ambiental que sería el último acto de retribución de la naturaleza contra una especie equivocada.

Nuestras opciones climáticas serían fáciles si realmente estuviéramos enfrentando una amenaza existencial inminente. Las emergencias implican medidas extremas, un enfoque estrecho en un solo problema que puede justificar la suspensión del debido proceso democrático. Imagine la eficacia con la que el mundo podría colaborar si descubriéramos un asteroide masivo que se aproxima para un impacto en 2050. Pero, esto no es lo que enfrentamos.

La afirmación de que el cambio climático amenaza con una catástrofe inminente es un intento de jugar una carta de triunfo de la ciencia (aparentemente) objetiva para evitar el debate sobre las compensaciones en el corazón de la política climática y sobre el papel que juegan los valores en la conducción de cada uno de ellos para nuestros juicios personales sobre el peso moral que otorgamos a los intereses contrapuestos. Pero el cambio climático es uno de muchos problemas, por lo que no hay sustituto para una evaluación realista de nuestros riesgos y un debate abierto sobre las compensaciones entre ellos, ya que no podemos evitar todos los riesgos ni resolver todos los problemas.

Si no hay una amenaza existencial inminente, ¿por qué queremos detener el cambio climático? Porque los riesgos climáticos son graves. Si bien es cierto que el cambio es la única constante en la larga evolución del clima terrestre, la humanidad industrial se ha convertido en

una fuerza geológica que impulsa el cambio a un ritmo sin precedentes. La combustión de combustibles fósiles ha elevado el dióxido de carbono a niveles no vistos durante millones de años. Y el ritmo se acelera; aproximadamente la mitad de todo el dióxido de carbono emitido en la historia humana se emitió en el último cuarto de siglo. Si continuamos en nuestro curso actual, dentro de este siglo, dentro de la vida de mis hijos, las acciones humanas bien pueden llevar las concentraciones de dióxido de carbono a niveles no vistos desde el Eoceno, el último período en el que los geocientíficos confían en que las concentraciones de dióxido de carbono estaban por encima de 1000 partes por millón, unas cuatro veces su valor preindustrial de unas 270 partes por millón. El Eoceno fue una era en el registro geológico que terminó hace unos treinta y cinco millones de años, una era en la que los cocodrilos caminaron por las costas de la isla Axel Heiberg en el actual Ártico canadiense.

Las emisiones globales de dióxido de carbono ahora superan los treinta mil millones de toneladas métricas por año, un promedio de cinco toneladas per cápita. Un estadounidense promedio es responsable de unas veinte toneladas, cuatro veces el promedio mundial. Este es un gran número, el peso de unos diez coches por persona cada año. La masa de dióxido de carbono que desechamos en la atmósfera empequeñece por un factor de cuarenta la masa de basura que enviamos a los vertederos. Ahora supera todos los flujos de materiales impulsados por humanos, incluidos los movimientos gigantescos de sobrecarga de minas. Si el dióxido de carbono fuera basura, una masa maloliente que tiene que ser empujada con excavadoras, nos habríamos enfrentado a este problema hace mucho tiempo.

La raíz de la amenaza climática es que la humanidad está moviendo el carbono desde depósitos geológicos profundos hacia la biosfera aproximadamente cien veces más rápido que el proceso natural correspondiente en el que el carbono escapa de la corteza terrestre en lugares como las fumarolas volcánicas. Si bien persiste una incertidumbre significativa sobre la sensibilidad del clima al aumento del dióxido de carbono y sobre la atribución del calentamiento reciente al aumento histórico del dióxido de carbono, la aceleración humana sin precedentes del ciclo del carbono es un hecho indiscutible.

No podemos predecir con precisión los resultados de nuestro “experimento” descontrolado en nuestro planeta, pero lo cierto es que si continuamos en nuestro rumbo actual, estamos comprometiendo a nuestros hijos a cambios climáticos que serán extraordinariamente rápidos en comparación con los que la humanidad ha experimentado durante los últimos diez milenios de años, desde la invención de la agricultura, cuando las concentraciones de dióxido de carbono se mantuvieron dentro del 5 por ciento de su promedio plausible, por ejemplo, que si seguimos emitiendo dióxido de carbono al ritmo actual, el nivel del mar podría aumentar más de cinco metros en unos pocos siglos, lo suficiente como para alterar drásticamente las costas. Las áreas bajas como Florida se inundarían.

No hay nada malo con el clima del Eoceno; no hay ninguna razón inherente por la que debamos preferir nuestros cocodrilos en los Cayos de Florida en lugar de en la isla Axel Heiberg. Los riesgos climáticos provienen de la tasa de cambio, no porque el clima actual sea un óptimo mágico para la vida. Nuestras infraestructuras, nuestros cultivos, las mismas ubicaciones de nuestras ciudades costeras han evolucionado para el clima actual.

Si bien las ciencias sociales no pueden predecir con precisión las repercusiones económicas y sociales del rápido cambio climático, y aunque algunos sectores o regiones sin duda se beneficiarán, los perdedores superarán en número a los ganadores. El análisis de los impactos climáticos a menudo se enfoca en los daños económicos agregados que se cree afectan a un pequeño porcentaje de la economía mundial, pero esto asume implícitamente que los ganadores compensarán a los perdedores. Quizás. O quizás las tensiones sociopolíticas que surjan de esta rápida reorganización del mazo planteen los mayores riesgos.

Incertidumbre + Inercia = Peligro

El cambio climático es un problema particularmente peligroso y difícil por la forma en que combina inercia e incertidumbre. El clima responde a la acumulación de emisiones en la atmósfera. Y como la acumulación de agua en una bañera, el nivel no baja rápidamente cuando uno cierra el grifo. Al igual que la bañera, el carbono es un problema de almacenamiento y flujo: el carbono atmosférico es el almacenamiento, la combustión de combustibles fósiles de la humanidad es la entrada dominante y la lenta eliminación de carbono por parte del océano es el desagüe.

El calentamiento en 2030, por ejemplo, está impulsado por las emisiones de carbono históricas hasta 2030, por lo que incluso si comenzáramos un programa masivo de recortes de emisiones hoy que pudiera reducir las emisiones a cero para 2030, una transformación industrial casi inconcebible, habría sorprendentemente una pequeña reducción en el calentamiento para 2030 porque gran parte del carbono que calentará el mundo en 2030 ya se ha emitido durante el último siglo.

El carbono proyecta una larga sombra sobre el futuro: mil años después de que dejemos de bombear carbono al aire, el calentamiento seguirá siendo aproximadamente la mitad del que fue el día que nos detuvimos, suponiendo, por supuesto, que no hagamos nada para manipular el clima.

Más allá de la inercia física del ciclo del carbono, debemos enfrentarnos a la inercia económica.

Sufrimos de la ilusión persistente de que podemos lograr rápidamente el cambio estructural profundo necesario para descarbonizar nuestra economía. La ilusión se alimenta del hecho de que, como consumidores, compramos ropa, productos electrónicos y automóviles —"capital social" para un economista— que tienen una vida útil muy corta en comparación con el capital social que forma el esqueleto mismo de nuestra economía industrial: fábricas y redes mundiales de distribución de materiales, combustibles y electricidad.

Pocos de nosotros vemos esta infraestructura de primera mano; pocos trabajamos en centrales eléctricas y refinerías, por lo que no apreciamos en nuestras entrañas cuánto dinero y material se invierte en ellas ni sabemos cuánto tiempo viven.

La construcción del complejo River Rouge de Ford comenzó en 1917 y la planta sigue siendo un nodo central de la infraestructura de producción de vehículos de Ford. La flota de plantas de energía nuclear y de carbón que suministra la mayor parte de la electricidad de los EE. UU. es solo unos años más joven que el ciudadano estadounidense promedio.

Esto no es una excusa para la inacción. Todo lo contrario: la inercia de nuestro sistema energético es una razón por la que deberíamos haber comenzado su transformación hacia alternativas bajas en carbono hace décadas, cuando los científicos descubrieron por primera vez el alcance del riesgo climático del carbono.

Terminar con las emisiones de carbono significa terminar con el uso convencional de combustibles fósiles, la fuente de energía que impulsa nuestra civilización. Sabemos cómo

generar energía sin carbono utilizando fuentes como la eólica, la nuclear, la solar o los combustibles fósiles con captura y almacenamiento geológico de CO_2. Pero cambiar a energía libre de emisiones no es como un cambio entre productos impulsado por el consumidor. No se trata de Coca-Cola versus Pepsi o incluso de SUV versus autos pequeños. Reducir las emisiones a cero significa reemplazar una gran parte de la infraestructura pesada sobre la que descansa nuestra sociedad.

Si dejáramos de fabricar autos de gasolina hoy y cambiáramos a vehículos eléctricos, pasaría alrededor de una década antes de que la mayoría de los autos en las calles fueran eléctricos. Y un cambio a la electricidad solo permite reducciones profundas en las emisiones si descarbonizamos el suministro de electricidad. La inercia combinada del ciclo del carbono y la economía humana es tan grande que si empezáramos esfuerzos dramáticos para descarbonizar nuestro sistema energético hoy, no veríamos la mayoría de los beneficios de la reducción del cambio climático hasta finales de este siglo.

Entonces hay incertidumbre. El calentamiento es proporcional a las emisiones durante este siglo en el sentido de que si duplicamos nuestras emisiones duplicaremos aproximadamente el calentamiento. El problema es que no podemos predecir con precisión la cantidad de calentamiento que obtendremos para una cantidad determinada de emisiones, la "sensibilidad climática".

Supongamos que emitimos mil billones de toneladas de carbono este siglo. Las emisiones de carbono de la humanidad ahora son diez mil millones de toneladas por año y van en aumento, por lo que mil millones de toneladas es la cantidad que obtendríamos si detuviéramos el crecimiento y mantuviéramos las emisiones en su tasa actual durante el siglo. Con suerte, el calentamiento resultante podría estar por debajo de 1 grado centígrado, todavía casi el doble del calentamiento que experimentó el mundo durante el siglo XX, pero con aproximadamente las mismas probabilidades, los dados podrían estar en nuestra contra y el calentamiento global podría estar por encima de los 4 grados, un enorme cambio climático equivalente a la mitad del calentamiento entre las profundidades de la edad de hielo y el clima actual. El resultado más probable está algo por encima de la marca de 2 grados que se considera ampliamente como un límite superior de calentamiento aceptable.

Por supuesto, este es un caso optimista porque sin esfuerzos dramáticos para restringir las emisiones de carbono no mantendremos las emisiones totales de este siglo en el escenario de crecimiento cero de mil millones de toneladas.

Peor aún, el vínculo entre las emisiones de carbono y los efectos del cambio climático, como la pérdida de cultivos o el aumento del nivel del mar, es aún más incierto.

La incertidumbre cae en cascada desde las emisiones de carbono hasta el riesgo. Considere el aumento del nivel del mar: primero está la incertidumbre que conecta las emisiones de dióxido de carbono (que controlamos) con la concentración de dióxido de carbono que se acumula en la atmósfera.9 Luego tenemos la incertidumbre en la sensibilidad climática discutida anteriormente. Luego tenemos incertidumbre en la predicción del cambio climático sobre las grandes capas de hielo y en los océanos que las calientan, y finalmente incertidumbre en la respuesta de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida a ese calentamiento.

Las “colas” de la curva de distribución de probabilidad de baja probabilidad pero de alta consecuencia —la pequeña posibilidad de que los dados rueden en nuestra contra—

representan gran parte del riesgo climático general. Además, no podemos estimar muy bien la incertidumbre: no sabemos cuánto no sabemos.

Juntas, la incertidumbre y la inercia y esto hace que el problema climático sea peligroso: si no tenemos suerte y el cambio climático es particularmente grave, cuando nos demos cuenta de que los dados climáticos están en nuestra contra, será demasiado tarde para resolver nuestros problemas con una conversión en el lecho de muerte a energías limpias. .

Reducir las emisiones

Hay buenas noticias. Los gobiernos del mundo firmaron la Convención Marco sobre el Cambio Climático en 1992 y la ratificaron en dos años. La convención obliga a sus signatarios a estabilizar "las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas con el sistema climático". El gasto en energía limpia se está disparando: en los últimos años, el mundo ha gastado alrededor de un cuarto de billón de dólares por año en energía limpia, principalmente energía eólica y solar.

Esto es aproximadamente un tercio del uno por ciento de la producción económica mundial. Está más o menos en línea con el gasto que los modelos económicos sugieren que se necesita para encaminarnos hacia el objetivo de la convención de estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero mediante la reducción de las emisiones a (casi) cero durante medio siglo.

Sin embargo, a pesar de todos los tratados y la construcción de molinos de viento, las emisiones están aumentando rápidamente. Las emisiones globales de carbono han crecido alrededor de un 3 por ciento por año desde 2000. Hubo una breve baja para la recesión de 2008, pero las emisiones ahora están creciendo tan rápido en este siglo como lo hicieron en la década anterior a la crisis del petróleo de 1972, un evento ampliamente visto como el punto de inflexión del crecimiento exponencial hacia la eficiencia energética y las energías alternativas. En lugar de ralentizarse, el crecimiento de las emisiones se ha acelerado desde que se firmó el Convenio Marco. Las emisiones han estado constantemente en el extremo superior de las proyecciones formales de emisiones que se utilizan para predecir el cambio climático futuro.

Recordar las existencias y el flujo: las emisiones cambian el clima cuando el dióxido de carbono y otros gases se acumulan en la atmósfera. Las concentraciones de dióxido de carbono acumulado en la atmósfera alcanzarán las 400 partes por millón el próximo año. Si bien un número redondo no significa nada para la naturaleza, pasar esa marca con la concentración creciendo a más de 2 partes por millón cada año (y acelerando) es un poderoso símbolo de fracaso colectivo. Bill McKibben está haciendo un trabajo brillante organizando el activismo climático alrededor de 350.org, pero las posibilidades de detenerse antes de 500 o de mantener el aumento de las temperaturas globales por debajo del objetivo de 2 grados centígrados parecen remotas.

Gran parte del crecimiento reciente de las emisiones proviene de China, pero incluso en Europa hay señales inquietantes de que es posible que no se logren los recortes de emisiones requeridos. Si bien las emisiones en la Unión Europea han disminuido levemente desde 2000, la tasa de disminución no es lo suficientemente rápida. Además, el Sistema Europeo de Comercio de Emisiones, la piedra angular del plan europeo para reducir las emisiones, se está desmoronando, a pesar del enorme gasto en energías renovables. El consumo europeo

de carbón creció un 2 % durante 2012.10 El carbón es sin duda el peor infractor tanto para el clima como para la salud humana.

El cierre de las centrales eléctricas de carbón es el primer paso de cualquier plan racional para hacer frente al cambio climático. No hay mejor medida del fracaso que el hecho de que el consumo de carbón ha aumentado en Alemania, un líder en políticas verdes que probablemente tiene el gasto per cápita más alto del mundo en energía limpia.

Si pudiera echar un vistazo omnisciente al sistema energético mundial para evaluar el ritmo de las acciones, no retóricas ni símbolos, para reducir las emisiones, probablemente se vería obligado a concluir que tales acciones fueron casi insignificantes.

¿Por qué existe tal desconexión entre los esfuerzos y el resultado? ¿Por qué el gasto en energía limpia ha producido resultados tan magros? O bien el costo de reducir las emisiones es mucho más alto que las estimaciones de los analistas sobre lo que se necesita, o el dinero se está malgastando gravemente. Las emisiones de carbono son tan grandes que solo se pueden lograr reducciones profundas mediante acciones que sean rentables y escalables.

Gran parte del dinero para energía limpia se ha gastado en proyectos con costos de reducción muy altos (dólares por tonelada de dióxido de carbono), como la energía solar fotovoltaica en los techos de Alemania, el etanol de maíz o los parques eólicos chinos construidos en lugares con escasos recursos eólicos e inadecuados para la conexión a la red eléctrica. Pienso en proyectos como paneles solares en casas lujosas como "joyas verdes". Pueden servir como poderosos símbolos de compromiso ecológico, pero hacen muy poco para ayudar al clima.

La amarga verdad es que los esfuerzos del mundo para reducir las emisiones (con algunas excepciones) se han convertido en una guerra falsa de exhortación audaz y acción simbólica. Es tentador afirmar que los recortes de emisiones son imposibles y que debemos buscar alternativas como la geoingeniería. Esto es doblemente incorrecto.

Primero, la geoingeniería solar puede reducir los riesgos a corto plazo, pero no puede sacarnos de la necesidad a largo plazo de reducir las emisiones. En segundo lugar, afirmar que las emisiones no se pueden reducir es eliminar la agencia humana y la responsabilidad como si las emisiones provinieran de alguna especie distinta a la nuestra.

Es posible reducir las emisiones a casi cero en medio siglo mientras se mantiene un nivel de vida alto y creciente. Las emisiones no se reducen con retórica, sino mejorando la eficiencia energética y reemplazando la infraestructura energética de altas emisiones, como las centrales eléctricas de carbón, con energía de bajas emisiones, como la energía solar, eólica o nuclear. Explorar los medios para hacer una reducción de emisiones tan profunda está más allá del alcance de este libro, pero baste decir que podría requerir un nivel de gasto similar al 5 por ciento que gasta Estados Unidos en el ejército, y dinero habría para ser gastado con una disciplina de mente dura para encontrar opciones de bajo costo. Un plan realista podría incluir fuertes estándares de eficiencia del consumidor; un impuesto al carbono sustancial para toda la

economía, acompañado de reducciones en otros impuestos, en particular impuestos para los pobres, que sienten que la energía cuesta más; una apuesta agresiva por la investigación y las nuevas tecnologías de energía limpia; y finalmente, la eliminación de subsidios específicos para tecnologías boutique que no brindan reducciones de emisiones rentables. Nadie puede afirmar que conoce la mejor combinación de tecnologías de energía limpia, pero mi corazonada es que será difícil hacer recortes rápidos en las emisiones sin algunas fuentes de energía no variables, de alta intensidad y bajas en carbono, como la energía nuclear o los combustibles fósiles con captura y almacenamiento de carbono. Finalmente, moverse lo suficientemente rápido requeriría una toma de decisiones rápida de un tipo que ahora parece estar fuera del alcance de muchos gobiernos democráticos en Occidente.

Pero pudo estar hecho. Si bien el 5 por ciento del PIB es dinero real, es aproximadamente la mitad de lo que Estados Unidos gastó en su ejército en la década de 1960 y menos de un tercio de lo que ahora gasta en atención médica. Afirmar que los recortes rápidos de emisiones son imposibles es eludir la responsabilidad de nuestras acciones.

3

Ciencias

La ciencia no puede resolver cuestiones políticas o éticas sobre la geoingeniería solar, pero tampoco se puede desarrollar un buen juicio sin una comprensión firme de algunos hechos centrales. El buen juicio requiere hechos y ética.

No confíe en mi juicio ético sobre la geoingeniería solo porque sé muchos hechos; y del mismo modo, no confíes en las afirmaciones sobre hechos de alguien solo porque compartes su postura ética.

Las preguntas esenciales de hecho con respecto a la geoingeniería solar son fáciles de plantear: ¿Con qué eficacia puede contrarrestar el cambio climático? ¿Y cuáles son los riesgos? ¿Cuáles son las incógnitas? En cuanto a la cuestión de la eficacia, sabemos que el cambio climático producido por la dispersión de un poco de luz solar no es lo mismo que el cambio producido por el dióxido de carbono y ese hecho limitará cualquier tecnología de geoingeniería solar para contrarrestar completamente el cambio climático. En cuanto al riesgo ambiental, sabemos que cualquier método que se utilice para dispersar la luz solar tendrá efectos secundarios, como la pérdida de ozono provocada por el aerosol de sulfato en la estratosfera. Este capítulo explora la eficacia y el riesgo ambiental, mientras que las preguntas sobre la ética y la política de la geoingeniería ocuparán los dos últimos capítulos del libro.

El conflicto político con demasiada frecuencia se transforma en batallas de poder sobre lo que constituye un hecho objetivo. En ninguna parte es esto más evidente que en la batalla por la política climática, donde las diferencias legítimas sobre el papel del gobierno y las duras concesiones entre el bienestar de las generaciones presentes y futuras se juegan como debates estridentes sobre el récord de temperatura del "palo de hockey".

Esto es similar al debate sobre la geoingeniería, donde los defensores minimizan los riesgos y los opositores los exageran.

Eficacia: ¿Con qué eficacia podríamos reducir los riesgos climáticos si pudiéramos gestionar la luz solar?

Cualquier discusión sobre el cambio climático se basa en una distinción, a menudo implícita, entre el forzamiento climático y la respuesta climática. Los forzamientos climáticos son factores externos que influyen en el clima. Un cambio en la intensidad de la luz solar que llega a la parte superior de la atmósfera se denomina “forzamiento solar”. Nada de lo que hace la Tierra puede influir en la intensidad del Sol, por lo que un cambio en la constante solar es un impulsor externo, una causa, de cualquier cambio climático resultante.

La Tierra absorbe la luz solar e irradia la energía de vuelta al espacio en forma de calor infrarrojo. La naturaleza siempre equilibra su presupuesto de energía, por lo que si la Tierra absorbe un poco más de luz solar, las temperaturas deben aumentar para que el sistema vuelva a estar en equilibrio al irradiar un poco más de calor infrarrojo para equilibrar el calor extra absorbido por el sol. El calentamiento es una respuesta al forzamiento solar.

El dióxido de carbono tiene un efecto aislante que dificulta que la Tierra irradie calor infrarrojo, por lo que cuando los niveles de dióxido de carbono aumentan, la temperatura debe aumentar un poco para permitir que el planeta equilibre su presupuesto energético. Esta es la esencia del calentamiento global: una respuesta al forzamiento climático por el dióxido de carbono.11

Usando este marco de forzamiento/respuesta, podemos decir que la geoingeniería es la manipulación intencional de los forzamientos climáticos con el objetivo de contrarrestar el cambio climático no deseado. Llegaremos a la tecnología más adelante, pero por ahora digamos que el método más plausible es, como mencioné anteriormente, agregar aerosoles reflectantes como sulfatos a la estratosfera, donde reflejan parte de la luz solar de regreso al espacio.

Si nuestros problemas climáticos se debieran a que el sol se vuelve más brillante, podríamos usar la geoingeniería de aerosoles para lograr una solución casi perfecta para el calentamiento resultante porque el forzamiento climático de los aerosoles podría, por diseño, ser casi exactamente igual y opuesto al forzamiento climático del aumento de luz de sol.

Después de todo, la esencia de la geoingeniería solar es reflejar parte de la luz solar.

El cambio climático causado por el dióxido de carbono no puede compensarse con tanta precisión porque el forzamiento radiativo del dióxido de carbono es cualitativamente diferente del forzamiento radiativo de la geoingeniería. El forzamiento radiativo positivo del aumento de dióxido de carbono, por ejemplo, actúa tanto de día como de noche, mientras que el forzamiento negativo de la luz solar reducida actúa solo durante el día. Si se calienta el clima agregando dióxido de carbono, se puede enfriar a la temperatura original seleccionando la cantidad adecuada de geoingeniería, pero el clima resultante tendrá noches más cálidas y días más fríos que el clima original sin perturbaciones.

Las diferencias de temperatura entre el día y la noche son un problema menor para la geoingeniería, pero ilustran la física detrás del hecho de que la reducción de la luz solar no puede restaurar perfectamente un clima calentado por el dióxido de carbono. La misma línea de argumentación se aplica al ciclo estacional porque el calentamiento del dióxido de carbono se siente casi por igual en el verano y el invierno, mientras que el enfriamiento de la geoingeniería es más fuerte en el verano, cuando el calentamiento solar es más intenso.

Dadas las marcadas diferencias en los patrones de forzamiento radiativo del dióxido de carbono y la geoingeniería, uno podría esperar que la geoingeniería hiciera un pésimo trabajo contrarrestando el cambio climático. El primer experimento de modelo climático para probar la eficacia de la geoingeniería surgió de una discusión en una reunión en Aspen en 1998. Lowell Wood exaltaba las virtudes de la geoingeniería.

Varios de nosotros mordimos el anzuelo, sobre todo Ken Caldeira, quien interrumpió a Lowell desde el fondo de la sala, diciendo, en esencia, “¿No sabes nada de ciencia atmosférica? Los forzamientos radiativos son muy diferentes por lo que la compensación climática será pésima.”12

Para el crédito duradero de Caldeira, regresó a su laboratorio y probó sus suposiciones ejecutando un experimento de modelo climático, anticipando que mostraría cuán mal funcionaba la geoingeniería y probaría así que Wood estaba equivocado.

En cambio, Caldeira descubrió lo contrario: la geoingeniería hizo un trabajo sorprendentemente preciso al compensar el cambio climático causado por el aumento del dióxido de carbono.13

Catorce años después de la primera simulación del modelo de Caldeira, la mayoría de los principales modelos climáticos se han utilizado para simular la eficacia de la

geoingeniería. La primera simulación de Caldeira simplemente ajustó la constante solar del modelo para simular una atenuación solar uniforme. Las simulaciones recientes son mucho más sofisticadas. Incluyen cosas como el tratamiento de última generación de la física de los aerosoles de sulfato y pruebas de otros métodos de geoingeniería, como el blanqueamiento de nubes con aerosol de sal marina. Utilizan "conjuntos" que comprenden miles de modelos

climáticos individuales, cada uno programado con una representación ligeramente diferente de la física atmosférica, como herramienta para evaluar la incertidumbre.

A pesar de los resultados alentadores, el hecho esencial permanece: ningún método plausible de geoingeniería produce un forzamiento radiativo que sea exactamente lo contrario del forzamiento del dióxido de carbono. Podríamos utilizar la geoingeniería para mantener la temperatura media de la superficie del planeta, o incluso para reducirla a su valor preindustrial, pero el clima resultante no sería exactamente el mismo que el clima preindustrial.

Si no podemos restaurar el clima preindustrial con geoingeniería, ¿hasta dónde podemos llegar para reducir los peores impactos del cambio climático? Los impactos climáticos son locales. Nadie siente el clima promedio global. Así como la temperatura y la precipitación responden de manera diferente a la geoingeniería, también lo hace el clima en diferentes regiones del mundo. Sin embargo, sorprendentemente, se ha avanzado poco en la comprensión de la eficacia de la geoingeniería para limitar los riesgos climáticos regionales, como el clima extremo o la pérdida de productividad agrícola.

El debate sobre la efectividad de la geoingeniería rebota con demasiada frecuencia entre los defensores que promocionan la respuesta promedio global y los críticos que identifican los efectos regionales donde la geoingeniería empeora las cosas. Ambos argumentos son válidos, pero oscurecen el hecho de que la cantidad de forzamiento radiativo generado por geoingeniería, y por lo tanto sus efectos, es una elección humana.

El dióxido de carbono calienta el mundo, lo que aumenta las precipitaciones. También tiene un efecto directo separado de suprimir la precipitación. Entonces, mientras que los niveles de precipitación aumentan con los niveles de dióxido de carbono, el aumento neto es menor de lo que habría sido si el mundo se hubiera calentado por algún otro medio, como un aumento en la intensidad del sol.

Supongamos que el mundo se calienta con dióxido de carbono y luego se enfría con geoingeniería hasta que la temperatura promedio vuelve a su nivel preindustrial. El clima resultante tendrá menos precipitaciones que el original.

Este hecho a menudo se convierte en afirmaciones de que la geoingeniería provocará una disminución de las precipitaciones y una posible sequía. Esto es incorrecto y engañoso: ignora el papel del dióxido de carbono en la supresión de la precipitación; y oscurece la elección de cuanta geoingeniería usar. Es cierto que si se utiliza la geoingeniería para restaurar la temperatura superficial promedio global a los valores preindustriales, la precipitación disminuirá. Pero es igualmente cierto que si se usa un poco menos de geoingeniería para que sea suficiente para restaurar la precipitación, la temperatura aumentará. Estas vistas son dos lados de

el mismo hecho: se necesita más forzamiento radiativo generado por geoingeniería para restaurar la temperatura que el que se necesita para restaurar la precipitación.

La falsa impresión de que la geoingeniería reducirá las precipitaciones se ve alimentada por el hecho de que la mayoría de los estudios de modelos climáticos han elegido la cantidad de geoingeniería para restaurar las temperaturas promedio a su valor preindustrial después de duplicar el dióxido de carbono. Esta puede ser una opción conveniente para ejecutar modelos climáticos, pero es una receta loca para la geoingeniería real. Muchos impactos climáticos surgen de la tasa de cambio: cinco grados cálidos durante mil años y casi todas las actividades humanas y la mayoría de los ecosistemas no tendrán problemas para adaptarse. Pero caliente los mismos cinco grados durante medio siglo y habrá grandes problemas. La aplicación repentina de suficiente geoingeniería para llevarnos de vuelta al valor preindustrial (nos hemos calentado alrededor de 0,8 grados centígrados por encima de eso) tendría grandes impactos.

Si tiene sentido utilizar la geoingeniería, creo que será en combinación con la reducción de emisiones y con el objetivo de reducir, pero no eliminar, la tasa de aumento de la temperatura. Esta estrategia no necesita reducir la precipitación promedio.

Así como es posible ajustar la cantidad de geoingeniería para restaurar la temperatura o precipitación preindustrial, pero no ambas, también se puede ajustar para minimizar el cambio climático en una región a la vez, pero no en todas las regiones a la vez. Juan Moreno-Cruz y Kate Rickie, dos de mis estudiantes de posgrado, trabajaron juntos para explorar la desigualdad de los impactos de la geoingeniería región por región. Nuestro objetivo era demostrar cómo los efectos desiguales pueden crear tensiones geopolíticas al exponer las fuertes compensaciones entre la cantidad de geoingeniería que sería mejor para una región en comparación con otra.

Nuestros resultados me sorprendieron: la geoingeniería hace un trabajo mucho mejor, región por región, de lo que esperaba. Ejecutamos el modelo con gases de efecto invernadero en aumento para simular el clima de 2030 y analizamos los cambios en cada una de las 22 regiones estándar que se utilizan ampliamente para el análisis de los impactos climáticos, comparando el clima de cada región con el de la década de 1990. Como se esperaba, el modelo pronostica cambios dramáticos con la mayoría de las regiones recibiendo más precipitaciones en la década de 2030 y aproximadamente una cuarta parte menos. Cuando agregamos la geoingeniería y elegimos la cantidad de aerosol de sulfato para minimizar los cambios en la precipitación: pudimos reducir el cambio promedio en un 87 por ciento. La región promedio había simulado la precipitación de 2030 dentro del 17 por ciento de los niveles de 1990.14 Este resultado contradice fuertemente la opinión generalizada de que la geoingeniería funciona solo para la temperatura o para cantidades promedio globales.

Una advertencia: estos resultados no son mejores que los modelos climáticos de los que dependen. No tengo confianza en números precisos como el 87 por ciento. Pero podemos decir que, con base en los mismos modelos utilizados para predecir el cambio climático a partir de los gases de efecto invernadero, la geoingeniería parece ser capaz de reducir sustancialmente el cambio climático, y presumiblemente los impactos climáticos, tanto a nivel mundial como regional, a pesar de la compensación inherentemente imperfecta que surge porque los forzamientos climáticos de los gases de efecto invernadero y la geoingeniería son intrínsecamente diferentes.

No obstante, la posibilidad de diferentes efectos regionales plantea preocupaciones válidas sobre la equidad. En mi opinión, estas preocupaciones surgen más agudamente de las preguntas sobre la legitimidad de la toma de decisiones en el uso de la geoingeniería solar, en lugar de los límites inherentes de la técnica en sí.

Desafortunadamente, la discusión sobre la geoingeniería en sí ha cristalizado en un debate sobre el monzón asiático, las lluvias estacionales que se producen cuando el aire cálido sobre la India se eleva, arrastrando el aire húmedo del océano hacia el interior. La preocupación fue planteada por primera vez por el científico Alan Robock, quien dijo que la inyección de sulfato en la estratosfera "interrumpiría los monzones de verano asiáticos y africanos, reduciendo las precipitaciones para el suministro de alimentos para miles de millones de personas". 15 Robock, un experto en volcanes y la forma en que las erupciones alteran el clima poniendo aerosoles de sulfato en la estratosfera, se ha convertido quizás en el científico crítico más visible de la geoingeniería.

Los expertos también han opinado sobre la amenaza de la geoingeniería para el monzón asiático.

Más de la mitad de todos los resultados de Google para "geoingeniería" ahora incluyen "monzón",16 y los expertos de izquierda como Arun Gupta argumentan que una élite tecnocrática (me cita por mi nombre) amenaza la vida de miles de millones con fines de lucro: "Muchos científicos tenemos el temor de que el bombeo de sulfatos a la atmósfera pueda causar que los monzones de Asia fallen, poniendo a más de mil millones de personas en riesgo de morir de hambre."17

De hecho, si se usa de manera imprudente, la geoingeniería podría amenazar a miles de millones con morir de hambre. Sin embargo, la narrativa de Gupta ignora todos los estudios hasta la fecha (incluyendo a Robock que sugieren que el uso apropiado de la geoingeniería podría reducir los riesgos climáticos para la agricultura asiática.

La retórica se equivoca en varias cosas. En primer lugar, la mayoría de los modelos de cambio climático muestran aumentos de precipitaciones perjudiciales en la región monzónica de Asia (piense en inundaciones y deslizamientos de tierra). Si la geoingeniería puede desacelerar o

detener este aumento de las precipitaciones, entonces está brindando un beneficio, no un daño. Una vez más, la afirmación de que la geoingeniería reducirá las precipitaciones se basa en la suposición de que la geoingeniería se utilizará para detener el aumento de las temperaturas. Esto no es un hecho sobre la geoingeniería, sino más bien una suposición sobre cuánto se usará.

En segundo lugar, una reducción de las precipitaciones no tiene por qué conducir a una sequía. La cantidad de agua superficial que se encuentra en los suelos o como escorrentía en los ríos depende del equilibrio entre la precipitación y la evaporación. Los impactos en el mundo real dependen de la humedad del suelo y la escorrentía, así como de la precipitación, por lo que observar la precipitación por sí sola tiende a exagerar los impactos. En el promedio global los dos deben ser siempre iguales, ya que toda el agua que se evapora en el aire debe regresar eventualmente como precipitación para cerrar el ciclo hidrológico. Un clima con un aumento de dióxido de carbono que ha tenido temperaturas mantenidas a niveles preindustriales por geoingeniería tiene menos precipitación y menos evaporación, pero puede o no tener más sequía. Uno debe hacer el análisis antes de hacer esa afirmación.

Tercero, los críticos pasan por alto un hecho relacionado. Los eventos climáticos extremos, como sequías o inundaciones, dependen de la fuerza general del ciclo hidrológico.

A medida que el mundo se calienta, el ciclo hidrológico se intensifica, provocando un aumento de los fenómenos extremos desproporcionado con respecto al simple aumento de la temperatura media y la precipitación. Este es uno de los factores más importantes que impulsan el impacto climático en un mundo que se calienta.18 Al debilitar el ciclo hidrológico, la geoingeniería puede, por lo tanto, ser más eficaz para reducir los impactos climáticos de lo que cabría esperar observando solo los cambios en los promedios.

Finalmente, los modelos ejecutados hasta la fecha sugieren que, si se usa adecuadamente, la geoingeniería podría aumentar sustancialmente el suministro de alimentos al reducir el estrés por calor durante el comienzo de la temporada de crecimiento en Asia y África, un efecto que es una de las causas más importantes de pérdida de cultivos a medida que el mundo se calienta. En el único estudio publicado hasta ahora que utilizó un modelo de última generación de productividad, fue el de Ken Caldeira y sus colegas que descubrieron que la geoingeniería solar podría aumentar los rendimientos de arroz y trigo en la India entre un 15 y un 25 por ciento.19

¿La preocupación por el monzón asiático está fuera de lugar? No. Si se usa tontamente, la geoingeniería podría interrumpir los monzones de verano de Asia y África y amenazar el suministro de alimentos para miles de millones de personas. Robock tenía razón al plantear el problema. Hay mucho que aún no sabemos. A pesar de la gran cantidad de ejecuciones de modelos informáticos que prueban la respuesta del modelo climático a la geoingeniería solar, la comunidad de investigación recién ahora está comenzando a utilizar estas simulaciones para observar los impactos climáticos reales en la agricultura, los ecosistemas y la salud humana.

Es vital que el debate sobre la geoingeniería pase de la física de los modelos climáticos a centrarse en los impactos humanos y ambientales. Los riesgos de la geoingeniería necesitan

atención urgente, junto con los beneficios. Pero el debate actual revela hasta qué punto las personas encajan la geoingeniería en narrativas convenientes mientras ignoran hechos que no se ajustan a su teoría.

SEÑAL Y RUIDO

Supongamos que intentamos con la geoingeniería durante una década, aumentando el forzamiento radiativo lo suficientemente rápido como para compensar la mitad del calentamiento de los gases de efecto invernadero acumulados. ¿Sabríamos qué tan bien funcionó o qué tanto falló? La respuesta corta es no. Incluso después de una década de manipular el clima a una escala sin precedentes, es posible que aprendamos muy poco sobre la eficacia de la geoingeniería.

En el lenguaje de la física, la “señal” de nuestro experimento podría no superar el “ruido” de la variabilidad natural.

El tiempo varía día a día. El clima es el clima promedio o, como dice un viejo refrán, "el clima es lo que esperas y el tiempo es lo que obtienes". El clima varía de una década a otra. Parte de esta variabilidad es causada por la variación en el forzamiento radiativo, como un volcán ocasional o una fluctuación en la intensidad del sol, pero otra parte es una fluctuación aleatoria que llamamos ruido.

Cuando la señal es más pequeña que el ruido, es difícil medir la señal incluso con buenos datos. Uno podría tener la teoría de que algún cambio en la ley tributaria aumentará el valor de ciertas acciones pero no podrá probar o refutar la teoría frente al ruido aleatorio del mercado de valores.

La dificultad de encontrar una señal enterrada en el ruido explica por qué, a pesar de siglos de bombear dióxido de carbono al aire, todavía no sabemos con precisión cómo está cambiando el clima.

El problema no es un mero detalle tecnocrático, ya que puede dar forma a la política global de la geoingeniería. Supongamos que una coalición de países comienza la geoingeniería y luego China se ve afectada por una sequía sin precedentes. Los funcionarios chinos estarían muy tentados de culpar a la coalición y buscar una compensación a pesar de la dificultad de probar la causalidad.

La confusión sobre la señal y el ruido infecta los debates sobre las pruebas a corto plazo.

Muchos argumentan que la geoingeniería no puede probarse significativamente sin una implementación a gran escala.20 Si bien nunca podemos estar seguros de la eficacia y los riesgos de la geoingeniería solo a partir de modelos, esta afirmación es doblemente incorrecta. Primero, podemos aprender mucho probándolo a menor escala si nos concentramos en respuestas que tienen una señal grande o poco ruido de fondo, como sería el caso si buscáramos cambios en

los aerosoles estratosféricos y la química después de la inyección de partículas. En segundo lugar, incluso si se probara a "escala completa", aún no resolveremos todas nuestras incertidumbres.

Geoingeniería de aerosoles: ¿cómo podemos gestionar la luz solar?

Si quisiéramos diseñar forzamiento radiativo a gran escala a bajo costo con efectos secundarios mínimos, ¿cómo lo haríamos? El método más plausible a corto plazo es aumentar la cantidad de aerosol de ácido sulfúrico en la estratosfera.21

Un aerosol es simplemente una suspensión de partículas finas en el aire. Una bocanada de polvo doméstico es un aerosol. También lo son la pulverización de gotas de aceite inyectadas en el cilindro de un motor diésel y las nanopartículas de ceniza que quedan cuando se quema cada gota de aceite. Esa ceniza se suma a la carga de aerosol en el aire urbano, lo que probablemente contribuya a mi asma, que contrarresto con un aerosol de esteroides rociado en mis pulmones. El aerosol de esteroides es una solución técnica muy imperfecta para el aerosol de contaminación, pero tanto los aerosoles como las soluciones técnicas imperfectas son omnipresentes.

Las partículas de aerosol dispersan la luz. Por eso vemos nubes pero no podemos ver el vapor de agua del que se condensan. Resulta que la cantidad de luz dispersada por cada kilogramo de aerosol es mayor si los aerosoles tienen unas pocas décimas de micra de ancho, aproximadamente del tamaño de los transistores en la CPU de su computadora y unas mil veces más pequeños que una gota de lluvia. Los aerosoles pequeños caen de la atmósfera mucho más lentamente que los grandes. Decir que un aerosol es una "suspensión" es solo una forma elegante de decir que las partículas aún no se han asentado. Una bala de cañón lanzada en la estratosfera golpearía el suelo en unos dos minutos, pero si se reduce a una décima de micra, es posible que se deba esperar más de dos años para que caiga a la tierra.

La estratosfera recibe su nombre porque está altamente estratificada, de modo que mientras el aire se mezcla horizontalmente, no se mezcla fácilmente hacia arriba o hacia abajo. Se distingue de la troposfera, o "esfera giratoria", la atmósfera inferior en la que vivimos, que se invierte rápidamente a medida que el aire caliente asciende y el aire frío desciende para ocupar su lugar. Una partícula de aerosol puede permanecer en la estratosfera durante años, mientras que la misma partícula puede durar solo días en la troposfera antes de ser capturada en una gota de lluvia y llevada a la tierra.

La estratosfera comienza a unos 7 a 15 kilómetros sobre nuestras cabezas. Es más alto en los trópicos y más bajo cerca de los polos y durante el invierno.

Los aviones comerciales de pasajeros navegan a una altitud de unos 10 kilómetros, por lo que, aunque no llegan a la estratosfera en los trópicos, uno pasa gran parte de un vuelo de invierno entre Europa y América del Norte en la estratosfera.

Los aerosoles tienen aproximadamente la misma capacidad para dispersar la luz solar de regreso al espacio, dondequiera que se encuentren en la atmósfera; se necesita aproximadamente la misma cantidad de aerosol en la troposfera o en la estratosfera para producir un forzamiento radiativo determinado. Pero, dado que la vida útil de los aerosoles es unas cien veces más corta en la troposfera, se debe agregar un nuevo aerosol cien veces más rápido de lo que se necesitaría para mantener la misma cantidad de aerosol en la estratosfera. Esta es la razón por la cual el aerosol estratosférico es preferible al aerosol troposférico. Para lograr el mismo forzamiento radiativo, el aerosol estratosférico no solo costaría unas cien veces menos, sino que también tendría efectos secundarios, como la lluvia ácida o la contaminación del aire, unas cien veces menores.

El inmenso apalancamiento proporcionado por los aerosoles estratosféricos es evidente en la proporción de carbono a azufre. Sólo se necesitan unas pocas toneladas de azufre en la estratosfera para compensar el forzamiento radiativo de un millón de toneladas de carbono en la atmósfera. Considere esto: el forzamiento radiativo se mide en vatios por metro cuadrado (W/m2). Desde el comienzo de la revolución industrial, las emisiones de dióxido de carbono han aumentado la carga atmosférica de carbono en alrededor de 240 000 millones de toneladas. Ese carbono añadido produce un forzamiento radiativo de alrededor de 1,7 W/m2, aproximadamente la intensidad con la que una bombilla de techo de 60 W ilumina el suelo debajo de ella. Un forzamiento radiativo de -0,85 W/m2, es una cantidad suficiente para contrarrestar la mitad del forzamiento actual de dióxido de carbono, requeriría inyectar alrededor de solo un millón de toneladas de azufre en la estratosfera cada año para mantener la cantidad requerida de aerosol de sulfato.

Este apalancamiento de casi un millón a uno está en la raíz tanto del riesgo como de la promesa de la geoingeniería de aerosoles estratosféricos; es la razón subyacente por la que es una herramienta tan poderosa y aterradora.

Riesgo

El riesgo mejor comprendido de la geoingeniería de sulfatos es la pérdida de ozono. La capa de ozono estratosférico es la protección natural del planeta contra la radiación ultravioleta del sol, que de otro modo sería lo suficientemente fuerte como para esterilizar la vida en la tierra.22 (Este ozono "bueno" de gran altitud es el mismo químico que el ozono "malo" de baja altitud que se forma en áreas urbanas cuando la luz del sol cocina el smog.)

El cloro actúa como un catalizador para destruir el ozono estratosférico. Los niveles naturales de cloro en la estratosfera son insignificantes. Esencialmente, todo el cloro proviene de la descomposición de los clorofluorocarbonos (CFC), una sustancia química hecha por el hombre. La historia de los CFC es en sí misma una advertencia sobre soluciones técnicas. Antes de la década de 1930, los refrigeradores usaban amoníaco, que es tan tóxico que las personas morían cuando los refrigeradores perdían refrigerante. Los clorofluorocarbonos surgieron como

productos químicos maravillosos, porque eran inertes y no tóxicos. Pronto fueron adoptados para una variedad de usos más allá de la refrigeración, desde propulsores para latas de aerosol hasta extintores de incendios militares.

Pero su misma inercia causó un nuevo problema. Sin un proceso de descomposición natural para eliminarlos de la atmósfera inferior, los CFC se abren paso gradualmente hacia la estratosfera, donde la fuerte luz ultravioleta los descompone y libera cloro. Que el cloro destruye el ozono proporcionando una forma rápida de para que los átomos de oxígeno adicionales en el ozono se unan, convirtiéndolos nuevamente en oxígeno.23 Los aerosoles interfieren con la química del ozono a través de un confuso laberinto de vías químicas, de modo que la adición de aerosol puede aumentar o disminuir las concentraciones de ozono. La vía principal por la cual las gotas de ácido sulfúrico de la geoingeniería reducirían el ozono es mediante la reducción de la cantidad de óxidos de nitrógeno (NOx) en la estratosfera. El NOx une el cloro en una sustancia química llamada nitrato de cloro que no cataliza la destrucción del ozono. Pero los sulfatos facilitan las reacciones que convierten a los NOx en depósitos de nitrógeno no reactivos. Cuando los aerosoles reducen el NOx, aumentan la fracción de cloro que destruye activamente el ozono.

El impacto de los aerosoles de geoingeniería depende no solo de los aerosoles de geoingeniería que agreguemos a la estratosfera, sino también de la cantidad de cloro que haya cuando lo hagamos. La carga de cloro está disminuyendo luego de la implementación de 1989 del Protocolo de Montreal y los tratados relacionados que eliminaron el uso de CFC. Por lo tanto, el riesgo de pérdida de ozono depende de cuándo utilicemos la geoingeniería. Si la usamos a finales de siglo, cuando los niveles de CFC sean bajos, habrá poco efecto; si lo usamos antes el efecto podría ser significativo. Utilizada a gran escala para 2045, la geoingeniería reduciría el ozono en un 10 % cerca de los polos, con pérdidas menores en latitudes medias. Pero incluso con la geoingeniería, la concentración de ozono en 2045 sería significativamente más alta (mejor) que la actual porque se espera que la carga de cloro estratosférico disminuya en un 30 por ciento entre ahora y 2045.24

Hay otros riesgos. Los aproximadamente 50 millones de toneladas por año de contaminación por azufre que actualmente arrojamos a la atmósfera inferior matan a alrededor de un millon de personas por año a causa del asma, las enfermedades cardíacas y el cáncer de pulmón.25

Las muertes por contaminación del aire por tonelada de azufre utilizada para la geoingeniería probablemente serán sustancialmente menores, ya que se distribuirían en todo el mundo (la contaminación del aire de las industrias se concentra cerca de los centros de población). Pero, si comenzamos a poner un millón de toneladas de azufre en la estratosfera cada año, probablemente contribuirá a miles de muertes por contaminación del aire al año.

Presumiblemente, la geoingeniería salvaría más vidas de las que necesitaría porque reduciría los riesgos climáticos que provocan muertes por estrés térmico, inundaciones o hambrunas. Pero esta proporción no resuelve las preocupaciones morales ya que morirán diferentes personas, y las acciones que causan las muertes se organizan fundamentalmente de diferentes maneras: las muertes por contaminación del aire son causadas por una miríada de fuentes, desde automóviles hasta centrales eléctricas, mientras que las muertes por geoingeniería serían atribuibles a un solo programa (presumiblemente) organizado centralmente.

El aerosol de sulfato es el diablo que conocemos. Debido al impacto de la contaminación por aerosoles de sulfato y de los volcanes, existe un cuerpo científico sólido para informar nuestra comprensión de los riesgos de la geoingeniería de aerosoles de sulfato. Los sulfatos plantean riesgos adicionales, como la lluvia ácida, además de los riesgos para el ozono y la salud discutidos anteriormente, pero los riesgos estudiados hasta la fecha parecen relativamente pequeños en comparación con los riesgos del cambio climático rápido. Se asociarán nuevos riesgos con nuevos métodos de ingeniería de forzamiento radiativo, como la posibilidad de usar nanopartículas diseñadas, que discutiré en el próximo capítulo.

La mayor preocupación no son los riesgos que conocemos sino un miedo sensible a lo desconocido-desconocido que nos pueda sorprender.

4

Tecnología y Diseño

Los argumentos a favor de la investigación en geoingeniería a menudo apelan a la ética de la libertad científica. Las discusiones sobre sus riesgos y eficacia se expresan de manera similar en un lenguaje que asume que la investigación descubrirá los riesgos y la eficacia como si fueran hechos de la naturaleza. Este encuadre malinterpreta profundamente la tarea en cuestión. Al hacer de la ciencia un descubridor pasivo de hechos, se entierra el papel activo de los desarrolladores de la tecnología. ¿Estamos tratando de proteger el Ártico o permitir que las personas más pobres y vulnerables limiten el daño que sufren por el cambio climático? ¿Queremos diseñar activamente el clima para maximizar la productividad global de los cultivos? La geoingeniería, como ciencia, enmarca el debate sobre el papel apropiado de la participación pública en la creación de herramientas para manipular el clima.

La ciencia no descubre herramientas para manipular el clima más de lo que la ciencia descubre el iPod. El desarrollo de ambos es una tarea de ingeniería que comienza con una concepción del problema a resolver y construye una nueva tecnología a partir de un depósito de conocimiento científico y tecnologías preexistentes.26 La ingeniería puede conducir a una nueva ciencia, por

la interacción entre las dos actividades, es ricamente bidireccional; pero, si bien la ingeniería y la ciencia están demasiado entrelazadas para permitir una demarcación clara, existe una diferencia esencial: la ingeniería trata sobre el diseño y la ciencia sobre la comprensión.

El diseño requiere un diseñador. Cada diseñador comienza con alguna necesidad humana que pretende satisfacer, y su concepción de esa necesidad, a su vez, impulsa su diseño. El diseñador puede ser un arquitecto solitario que esboza una casa familiar o un equipo de ingenieros aeroespaciales que diseñan un nuevo paquete de guía para un misil antiaéreo lanzado desde el hombro, pero por más erróneo que sea, la concepción del diseñador el problema a resolver juega un papel muy importante en la configuración de la tecnología resultante.

La ciencia es diferente. Se trata de entender, no de diseñar. Y esa comprensión se mide en una sola moneda: la precisión de sus predicciones. Richard Feynman una vez definió sabiamente la ciencia como “lo que hemos aprendido sobre cómo no engañarnos a nosotros mismos”. No existe un método universal, solo una serie de trucos para hacer mejores predicciones y evitar el autoengaño.

Algunos de los debates más acalorados en torno a la geoingeniería han asumido implícitamente que nos enfrentaríamos a una decisión de todo o nada para "encenderla" con toda su fuerza para gestionar alguna "emergencia climática" indefinida. No puedo concebir una situación en la que el encendido instantáneo sea inteligente; un aumento lento es una manera mucho mejor de comenzar.

También debemos liberarnos de la suposición demasiado común de que la geoingeniería progresará linealmente desde la investigación hasta el despliegue. Incluso si la geoingeniería comienza con un aumento lento, las tecnologías se desarrollan en bucles desordenados y conectados de forma múltiple. Deberíamos esperar sorpresa; podemos comenzar con aerosoles de sulfato para limitar las temperaturas extremas y terminar con diferentes tecnologías y objetivos.

Para comprender el potencial y los riesgos de la geoingeniería, se necesita una idea de las opciones que enfrentarán sus diseñadores y algunas ideas específicas sobre cómo podría usarse. Con ese fin, ofrezco un escenario específico para el despliegue. Por el momento, imagine que este plan altamente idealizado será administrado por alguna agencia apolítica integrada por los mejores y más brillantes de todo el mundo, que actúan sin prejuicios ni secretos bajo la égida de algún acuerdo internacional legítimo. Más adelante me iré más allá de esta fantasía ingenua para explorar cómo la geoingeniería podría interactuar con la política del mundo real.

Un escenario para el despliegue

Fase 1: Teoría y trabajo de laboratorio. El primer paso es simplemente tomarse en serio la aplicación de la ciencia, las ciencias sociales y la tecnología que tenemos a mano para comprender la eficacia y los riesgos de la geoingeniería solar. Para las ciencias físicas, esto significa ejercitar el conjunto actual de modelos atmosféricos para comprender lo que dicen sobre temas como la dinámica de los aerosoles en la estratosfera, el impacto en el ozono y el cambio climático que resulta del forzamiento radiativo de los aerosoles estratosféricos. Más allá de la ciencia atmosférica, aplicaríamos la caja de herramientas, como el análisis histórico de la forma en que el clima influye en el rendimiento de los cultivos o las enfermedades infecciosas, que se ha desarrollado para comprender los impactos del cambio climático. Luego, se podría explorar cómo la reducción imperfecta del cambio climático que brinda la geoingeniería puede reducir (¡o aumentar!) los impactos climáticos de la agricultura y los glaciares al suministro de agua, la biodiversidad y la desigualdad económica.

El trabajo de laboratorio podría centrarse en comprender las reacciones químicas que parecen ser particularmente importantes para predecir el impacto de los aerosoles en la química de la estratosfera y en desarrollar herramientas para generar y monitorear aerosoles en la estratosfera.

Fase 2: Experimentos en la atmósfera. Los primeros experimentos atmosféricos deberían centrarse en comprender el proceso por el cual se producen los aerosoles y por el cual pueden alterar la química de la estratosfera. Muchos de los procesos químicos atmosféricos clave tienen un ciclo diario, por lo que las observaciones de una nube de aerosol artificial durante solo uno o dos días podrían proporcionar una poderosa prueba de nuestra comprensión. Dichos experimentos son pruebas a pequeña escala de los procesos físicos que se construyen en modelos a gran escala. Debido a que el objetivo es probar procesos, no la respuesta a gran escala de la atmósfera al forzamiento, la cantidad de material necesario para tales experimentos sería minúscula en comparación con la cantidad necesaria para alterar el clima de manera medible. Los experimentos que mis colaboradores y yo estamos contemplando ahora utilizarían menos de cien kilogramos de material en aerosol, menos de una diezmillonésima parte de lo que necesitaríamos agregar cada año para tener un impacto fácilmente medible en el clima. Los experimentos se realizarían utilizando los mismos instrumentos científicos y plataformas de investigación (globos y aeronaves) que se han utilizado durante décadas para estudiar las causas de la pérdida de ozono en la estratosfera.

¿Cómo pueden los experimentos desarrollar la comprensión del riesgo sin imponer los mismos riesgos? Al estudiar los procesos de los componentes, como cuando las pruebas de estrés en una sola pala de turbina permiten a los ingenieros predecir fallas del motor sin poner en riesgo un avión lleno de personas. Pero ninguna cantidad de pruebas pieza por pieza puede predecir

las fallas que surgen de la interacción no anticipada de los componentes de la aeronave o las decisiones del piloto. Entonces, también, ninguna cantidad de proceso en los experimentos puede eliminar la posibilidad de problemas inesperados con la geoingeniería.

Algunos de mis colegas argumentan que el creciente poder de los modelos científicos significa que no necesitamos salir. Estoy en desacuerdo. Los modelos informáticos no sustituyen al mundo real. La ciencia ambiental está llena de sorpresas que solo fueron descubiertas por una observación cuidadosa. Las predicciones teóricas pueden asombrar: en 1974, Mario Molina y Sherwood Rowland predijeron los impactos de los clorofluorocarbonos a través de una vía química novedosa, antes de cualquier observación directa de la pérdida de ozono (una hazaña por la que compartieron un Premio Nobel). Pero la teoría tiene limitaciones. El agujero de ozono,27 por ejemplo, fue descubierto por un equipo británico utilizando minuciosas observaciones terrestres desde la Antártida. Los satélites de la NASA podrían haber descubierto el efecto antes, pero los analistas estaban cegados por la teoría; descartaron los datos que mostraban niveles muy bajos de ozono en la primavera antártica porque su software de análisis de datos asumió que las lecturas debían ser un error instrumental.

Más allá de la posibilidad de descubrir lo inesperado, los experimentos al aire libre proporcionarán, anticipo, una plataforma mejor que la mera teoría sobre la cual anclar los debates sobre la gobernanza de la geoingeniería.

El trabajo de la Fase 1 no se detendría cuando comenzaran los experimentos; más bien aceleraría la interpretación de los resultados de los experimentos de la Fase 2 y los asimilaría a predicciones mejoradas de la eficacia y a los riesgos de la geoingeniería.

Fase 3: Despliegue mínimo. Si, y solo si, los resultados de las dos primeras fases lo justifican, el siguiente paso sería el despliegue a la escala más pequeña en la que se pueda detectar una respuesta. El objetivo sería encontrar problemas inesperados antes de que sean lo suficientemente grandes como para causar daños. En un mundo racional, uno nunca intentaría ni siquiera un despliegue mínimo a menos que los resultados de las dos primeras fases sugirieran que los beneficios de la geoingeniería superan los efectos secundarios. El despliegue cruza un umbral más allá de la ciencia que exige alguna forma de gobernanza legítima.

La cuestión de cuán grande debe ser la implementación mínima es una cuestión de señal y ruido que las herramientas de la Fase 1 investigarían. Sin embargo, como experimento mental, supongamos que uno inyecta aerosoles en la estratosfera del hemisferio norte durante aproximadamente un año a una intensidad suficiente para producir un enfriamiento sobre la tierra de una fracción de grado centígrado. Esto sería no del todo detectable por encima de la variación de temperatura aleatoria de un año a otro, pero otros efectos, incluidos los cambios en la temperatura estratosférica, la intensidad y el carácter de la radiación solar, el balance de energía superficial de las capas de hielo y algunos efectos del ecosistema podrían detectarse con monitoreo cuidadoso..28

Nuevamente, el trabajo de las dos primeras fases no terminaría con la Fase 3, ya que podrían necesitarse nuevos experimentos a pequeña escala o trabajo de laboratorio para comprender los resultados de un despliegue mínimo.

Fase 4: Despliegue gradual. Si, después de las primeras tres fases, la geoingeniería todavía parece beneficiosa, se podría comenzar con un despliegue gradual.

El objetivo sería reducir el riesgo climático, pero no "activando" repentinamente un forzamiento radiativo creado por geoingeniería con la fuerza necesaria para contrarrestar todo el forzamiento radiativo humano. Eso enfriaría el planeta hacia el clima preindustrial, un desastre potencial. La mayoría de los impactos del cambio climático, como los que afectan a la agricultura, dependen más de la tasa del cambio climático que de la cantidad absoluta de cambio, por lo que un aumento repentino y a gran escala sería peor que nada.

Además, algunos efectos secundarios negativos inesperados podrían detectarse solo a medida que la cantidad de geoingeniería aumenta más allá de un umbral desconocido.

Entonces, para controlar la tasa de cambio y maximizar la posibilidad de detectar problemas temprano, lo más sensato es aumentar gradualmente el forzamiento radiativo de la geoingeniería.

Considere este escenario específico: supongamos que aumentamos el forzamiento radiativo generado por la geoingeniería a un ritmo suficiente para contrarrestar la mitad del aumento en todos los demás forzamientos radiativos humanos. Sobre una base promedio mundial, esto reduciría la tasa de cambio climático aproximadamente a la mitad. Usando aerosoles de sulfato para contrarrestar el forzamiento radiativo, sería necesario aumentar la cantidad de azufre agregado de cero a unas 250 mil toneladas por año durante una década.

Para poner los riesgos de esta intervención en perspectiva: si compensamos la mitad del aumento actual en el forzamiento radiativo del cambio climático durante el próximo medio siglo, la entrada anual de azufre en la estratosfera en 50 años sería de alrededor de 1,3 millones de toneladas por año. Eso es menos de una quinta parte de la cantidad de azufre arrojada a la estratosfera por la erupción del Monte Pinatubo.

¿Qué tan rápido podría suceder todo esto? El tipo de esfuerzos de investigación científica descritos en la Fase 1 ya ha comenzado, aunque de manera lenta y descoordinada. En un mundo sin política, me imagino aumentando rápidamente estas actividades para producir un esfuerzo internacional a gran escala y poco coordinado dentro de cinco años, momento en el que podrían comenzar los primeros experimentos atmosféricos. Un despliegue que tendría efectos medibles a gran escala en la atmósfera (Fase 3) no comenzaría hasta dentro de una década, y tomaría un mínimo de media década de tales experimentos antes de que podamos comenzar inteligentemente un despliegue gradual. Eso nos lleva a 2025 y, de manera más realista, a 2035 con errores y sorpresas.

El ritmo lento significa que si uno quiere la capacidad de usar la geoingeniería para protegernos de algunas "sorpresas desagradables en el invernadero", como lo expresó Wally Broecker, un librepensador duro y uno de los gigantes intelectuales de las ciencias de la tierra, en un artículo de Nature de 1987 , entonces necesitamos comenzar una investigación seria ahora. Aunque no lo crea deberíamos haberlo hecho hace mucho tiempo.

VOLCANES ARTIFICIALES

La mayoría de los análisis de geoingeniería han asumido que inyectaríamos dióxido de azufre en la estratosfera, imitando el mecanismo por el cual los volcanes alteran el clima. Sin embargo, el dióxido de azufre es un gas incluso en la fría estratosfera inferior, donde las temperaturas pueden descender por debajo de -80 C, y un gas no se condensará para formar gotas de aerosol. Para hacer un aerosol, el dióxido de azufre primero debe oxidarse a ácido sulfúrico en un proceso natural que toma alrededor de un mes. Una vez creadas, las moléculas de ácido sulfúrico "quieren" condensarse para formar ácido sulfúrico líquido. Si las moléculas se forman cerca de una gota existente, se condensarán en ella, pero si no pueden encontrar una gota lo suficientemente rápido, las moléculas de ácido sulfúrico eventualmente se encontrarán y crearán una nueva gota.

Cuando un volcán inyecta dióxido de azufre en una estratosfera "limpia" con pocas gotas existentes, el resultado es que muchas gotas nuevas producen una capa de aerosol en la que la mayor parte del ácido sulfúrico crea partículas que tienen unas pocas décimas de micra de ancho, un tamaño de que son muy eficaces para dispersar la luz solar.

No lograría la misma distribución de tamaño de aerosol favorable si bombeara continuamente dióxido de azufre a la estratosfera. La mayor parte del azufre agregado terminaría encontrando las gotas existentes, aumentando su tamaño en lugar de crear otras nuevas. El tamaño importa. Las partículas de aerosol más grandes caen más rápido, por lo que pasan menos tiempo en la estratosfera y, por lo tanto, dispersan menos luz solar durante su vida. Además, la física de la refracción de la luz en partículas pequeñas dicta que a medida que las gotas crecen más de dos décimas de micra, se vuelven progresivamente menos eficientes para dispersar la luz solar.

En conjunto, estos dos efectos significan que una nube de aerosol de partículas grandes del tamaño de una micra ejerce un forzamiento radiativo (enfriamiento) mucho menor durante su vida útil que una nube en la que la misma cantidad de azufre se distribuye entre partículas más pequeñas.

Una posible solución a este problema de las "gotas grandes" es liberar vapor de ácido sulfúrico (en lugar de dióxido de azufre) desde un avión. Una columna de vapor liberada por un avión se mezcla rápidamente con el aire circundante, pero en los primeros segundos de mezcla la concentración es tan alta que el vapor se condensa en nuevas gotas pequeñas, incluso en presencia de un aerosol de fondo que estaría presente con la geoingeniería continua. Este método de ácido sulfúrico de "aerosol directo" puede ser significativamente más eficaz que la liberación de dióxido de azufre porque limita la tendencia del nuevo vapor a unirse a las gotas existentes. En nuestras simulaciones de este método, menos de 4 millones de toneladas de azufre por año fueron suficientes para compensar el forzamiento radiativo de toda la carga actual de gases de efecto invernadero de la humanidad, mientras que con el método del dióxido

de azufre se requiere más del doble de azufre.30 Esto es importante, ya que menos azufre debería significar menos riesgo ambiental.

Estas ideas no son nuevas. En la década de 1970, Mikhail Budyko, un eminente científico climático ruso, consideró el uso de dióxido de azufre para contrarrestar el cambio climático provocado por las emisiones de carbono de la humanidad, una idea que denominó "volcanes artificiales". Sin embargo, el problema de la “gota grande” no se descubrió hasta 2009, cuando un grupo de investigación en Zúrich lo demostró en simulaciones por computadora. En un año ayudé a reunir a científicos en Halifax, Boston y Zúrich para trabajar en la inyección directa de vapor de ácido sulfúrico como posible solución alternativa.

Toda la ciencia necesaria para comprender el problema de las gotas grandes y nuestra solución alternativa propuesta se conoce desde los esfuerzos de Budyko. El hecho de que nadie comenzó a analizar los detalles de la geoingeniería de aerosoles de sulfato hasta los últimos años ilustra cómo el dinero y las modas intelectuales dan forma a la frontera de la investigación. Durante décadas, un tabú de facto contra el trabajo serio en geoingeniería desalentó el trabajo cuantitativo; poco se hizo. El artículo de Paul Crutzen 200631 que abogaba por la investigación de la geoingeniería rompió ese tabú, no por las nuevas ideas, sino porque Crutzen, un premio Nobel, era creíble y porque su trabajo sobre la química del ozono, que se suponía era el principal riesgo de la geoingeniería, hacía imposible afirmar que ignoraba los riesgos.

El tabú había surgido de un temor bien intencionado de que hablar de geoingeniería debilitaría el impulso político para reducir las emisiones. Fue fuerte: varios científicos escribieron al difunto Steve Schneider, entonces editor de Climatic Change, rogándole que rechazara el artículo de Crutzen. En cambio, Schneider, quien había estado pensando en la geoingeniería desde los años setenta y cuyo apoyo me ayudó a impulsarme a trabajar en el tema, nos pidió a varios de nosotros que escribiéramos comentarios críticos para acompañar el artículo de Crutzen.

Solo entonces los investigadores comenzaron a arremangarse y ponerse a trabajar. Gran parte del progreso de la ciencia no proviene de los avances, sino de la aplicación cotidiana de lo que sabemos a nuevos dominios. Nuestro artículo sobre el método de aerosol directo no fue un gran avance, sino más bien una aplicación pedestre de los conocimientos actuales a un problema nuevo.

Esta es una lección importante. Si comenzamos un programa de investigación serio, la geoingeniería se despojará rápidamente de su (ilusoria) simplicidad. Surgirán nuevos problemas y se propondrán nuevas soluciones. Una cosecha de artículos científicos recientes que encuentran nuevos problemas con el método de aerosoles de sulfato sugiere que esto ya está sucediendo. Pero la financiación sigue siendo mínima porque los directores de investigación del gobierno evitan la controversia. Y con poca financiación, un pequeño grupo de investigadores domina la frontera de la investigación. Esto no es saludable, ya que la diversidad y la competencia son necesarias para evitar el pensamiento grupal. Creo que un programa de investigación sostenido y diverso que revele la complicada complejidad de la geoingeniería fomentaría un debate público más saludable y haría más difícil defender las posiciones extremas de que la geoingeniería es una panacea o una distracción imprudente.

Tecnología y coste para llegar a la estratosfera

¿Qué tan difícil sería mover un millón de toneladas de azufre por año a la estratosfera?

¿Qué costaría? La escritura popular está llena de los aspectos geniales de herramientas de geoingeniería. Las historias en los medios de comunicación que van desde Popular Science hasta la BBC debaten los méritos de las armas navales, las mangueras gigantes suspendidas por globos, los dirigibles y los aviones.

El enfoque excesivo en herramientas de implementación surge de un sano instinto: los lectores quieren una imagen física de lo que podría hacerse, y a los periodistas les resulta difícil pintar una imagen gráfica simple de la química estratosférica o la respuesta climática. En efecto, sin embargo, el tratamiento ingenioso distrae a la audiencia de las cuestiones difíciles de riesgo y compensación que están en gran medida desvinculadas de la elección particular de herramientas. Dicho esto, aquí describo algunas de las posibles tecnologías de implementación porque quiero dejar en claro que la tecnología no es el problema principal. La implementación no es difícil ni costosa.

Primero, debemos comprender qué tan alto se necesita obtener material para la geoingeniería estratosférica, ya que la altitud juega un papel importante en la determinación del costo y la dificultad de las tecnologías de entrega. Si bien la estratosfera a veces se extiende por debajo de los 10 kilómetros (32.000 pies), donde los aviones de pasajeros pueden llegar fácilmente a ella, el aire en esta parte de la estratosfera se mezcla rápidamente con la atmósfera inferior. El aerosol inyectado aquí tendría una vida útil medida en meses en lugar de años. Esto podría ser útil para los tipos de pruebas a corto plazo descritas en la Fase 2, pero probablemente no sería sensato para la geoingeniería de aerosoles a gran escala.32

La parte superior de la estratosfera está a unos 50 kilómetros (164.000 pies), lejos del alcance de los aviones prácticos, pero no es necesario llegar tan alto. El flujo natural de aire en la estratosfera se eleva hacia arriba desde las latitudes tropicales y se hunde hacia abajo sobre los

polos, por lo que, si uno puede inyectar aerosol un poco por encima del fondo de la estratosfera en los trópicos, sería transportado hacia arriba y luego hacia los polos, lo que da como resultado una vida útil prolongada y una distribución relativamente uniforme de aerosoles en toda la estratosfera.

Las simulaciones por computadora confirman esta intuición y sugieren que la inyección en los trópicos a altitudes un poco más de 20 kilómetros (65.000 pies) sería adecuada.

En principio, se podrían utilizar los aviones existentes, como los aviones de combate, pero los aviones de negocios modernos son más eficientes y mucho más baratos. Un Gulfstream G650, un jet de negocios de primera línea, vuela a altitudes de hasta 50.000 pies. Si se adaptara un G650 con un motor militar de derivación baja como el Pratt & Whitney F100, podría levantar una carga útil de 13 toneladas a 60.000 pies, una altitud que probablemente sería adecuada para el despliegue mínimo descrito en la Fase 3. Una flota de sólo veinte aviones adquiridos en unos pocos años a un costo de $ 1.5 mil millones debería permitir suficiente forzamiento radiativo para producir efectos climáticos a gran escala que son apenas detectables.33

La tecnología de implementación requerida no existe hoy en día como herramienta lista para usar, pero podría ser suministrada por cualquier número de proveedores utilizando lo que la industria aeroespacial llama tecnología comercial lista para usar. Probablemente podríamos construir herramientas de implementación mucho más rápido de lo que podríamos desarrollar el resto de la ciencia, la ingeniería y la gobernanza necesarias para comenzar la implementación de la geoingeniería. En este sentido se puede decir que la tecnología existe hoy.

Este no es un argumento a favor o en contra del despliegue inmediato. Es sencillo una declaración de capacidad.

Si, en una fase de despliegue completo, se necesitara para transportar millones de toneladas de material a la estratosfera de forma continua, no tendría sentido utilizar los aviones existentes. En cambio, uno construiría una pequeña flota de aeronaves personalizadas utilizando técnicas de construcción de aeronaves convencionales y diseños de motores de aeronaves modificados. El avión resultante sería similar en tamaño al jet de negocios pero tendría alas dramáticamente más largas, parecidas a las del ER-2/U-2 que jugó un papel tan importante en la ciencia estratosférica (y la geopolítica desde la crisis de los misiles en Cuba hasta Irak).). Incluyendo las inversiones en operaciones, así como el nuevo avión, el costo de mover materiales a 75.000 pies es de aproximadamente $1 por kilogramo.

Otra idea popular es la posibilidad de bombear material a la estratosfera usando una manguera larga suspendida por un globo estratosférico. Con suficiente esfuerzo, probablemente podría lograrse, y podría ser más barato que un avión. Las mangueras, sin embargo, tienen la desventaja de que no se pueden esparcir partículas horizontalmente tan fácilmente como sería necesario para algunos de los tipos más obvios de aerosoles estratosféricos.34

El único beneficio de la manguera estratosférica, si se puede hacer que funcione, es hacer que la geoingeniería sea aún más barata. Sin embargo, el costo es el único problema que no

se tiene con esta tecnología. De hecho, un enfoque temprano en hacerlo más barato envía precisamente el mensaje equivocado. El gobierno del Reino Unido tomó una decisión desacertada en 2010 cuando optó por financiar una prueba espectacular al aire libre de la tecnología de mangueras estratosféricas como parte del proyecto Inyección de partículas estratosféricas para ingeniería climática (SPICE). El proyecto SPICE completo tiene muchos investigadores excelentes que realizan proyectos que valen la pena, pero en 2011, el debate público se centró bastante en el experimento de la manguera. En la lucha pública más visible sobre la geoingeniería, el grupo ETC, uno de los principales críticos de la geoingeniería, denominó correctamente al experimento como la "manguera de Troya".

Esta experiencia apunta a la necesidad urgente de que los investigadores se vuelvan más disciplinados al vincular los experimentos con objetivos claros socialmente relevantes, como comprender el riesgo y la eficacia de la geoingeniería.

Finalmente, ciertamente es posible usar cañones navales o cohetes, pero el costo de llegar a una altitud de 25 kilómetros sería mucho mayor que el costo de un avión, a menos que se invente alguna nueva forma de aerosol de geoingeniería que requiera la entrega a altitudes mucho más altas, no es necesario considerar más estos sistemas.

¿Es caro? Tomando la estimación de $1 por kilogramo entregado a 75.000 pies y asumiendo un millón de toneladas de material por año, el costo total de la geoingeniería a gran escala sería de alrededor de $1 mil millones por año. Esto suena como mucho dinero, pero el contexto es crucial: las estimaciones sitúan el costo monetario mundial de los impactos del cambio climático en el vecindario de $ 1 billón por año para mediados de siglo, incluso si gastamos cantidades similares para hacer reducciones profundas de emisiones. El costo de modificar el equilibrio radiativo de todo el planeta durante una década podría ser inferior a los $6 mil millones que el gobierno italiano está gastando en diques y barreras móviles para proteger a una sola ciudad, Venecia, del aumento del nivel del mar relacionado con el cambio climático.

Hoy en día, el gasto global en tecnologías de energía limpia es de casi $300 mil millones por año, aproximadamente cien veces el costo directo de la geoingeniería de aerosoles estratosféricos.

Pero no estoy haciendo un argumento de costo-beneficio. No estoy sugiriendo que uno deba elegir la geoingeniería sobre la energía limpia. Ya sea que implementemos o no la geoingeniería, aún debemos descarbonizar nuestro sistema energético para reducir los riesgos climáticos a largo plazo junto con los impactos directos de la acidificación de los océanos. Sólo afirmo que el costo directo de la geoingeniería es insignificante en comparación con otros costos relacionados con el clima. De hecho, los bajos costos son preocupantes porque podrían tentar a algunas

naciones a lanzarse a juicios mal considerados o al despliegue unilateral. Los costos son tan bajos que probablemente no serán un factor determinante importante en las decisiones sobre geoingeniería. El economista Scott Barrett ha llamado a esto “la increíble economía de la geoingeniería”.

Límites

Me he centrado en un único método de geoingeniería solar, el aerosol de sulfato estratosférico. Con las tecnologías existentes y un esfuerzo modesto, podríamos comenzar a usar sulfatos para alterar el ritmo del cambio climático dentro de una década, probablemente más rápido de lo que podemos desarrollar una comunidad científica de base amplia con herramientas efectivas para monitorear su eficacia y buscar problemas inesperados, y casi con certeza mucho más rápido de lo que podemos desarrollar un sistema internacional estable para tomar decisiones sobre su implementación. Desde Facebook hasta la fertilización in vitro, la tecnología avanza cada vez más rápido que nuestra capacidad para absorberla.

Pero el clima es un problema a escala de un siglo.35 ¿Cuáles son los límites técnicos de la geoingeniería solar durante este siglo? Esbozaré algunas tecnologías avanzadas que podrían surgir, no para predecir lo que sucederá, ya que es una tontería, sino para ilustrar el potencial de resultados sorprendentes. A medida que más personas comienzan a pensar en las implicaciones sociales de la geoingeniería, naturalmente tienden a construir sus suposiciones sobre los riesgos y límites de la tecnología basándose en lo que ahora se sabe sobre los aerosoles de sulfato u otra tecnología, el blanqueamiento de nubes. Los aerosoles de sulfato son (casi) donde comenzó la historia; sería una tontería esperar que esto termine aquí.

Al adivinar qué tan rápido podrían surgir nuevas tecnologías, se debe tener en cuenta que el lento ritmo de desarrollo desde el trabajo pionero de Budyko y otros en la década de 1970 no es una constante inevitable de la tecnología de geoingeniería. Hasta hace unos años, esencialmente todo el trabajo era un pasatiempo no financiado por científicos con otros proyectos de investigación. Si comienzan los esfuerzos de investigación enfocados a gran escala, si la geoingeniería se convierte en un tema "de moda", entonces veremos una rápida innovación más allá de los sulfatos. La dinámica del éxito a través de la novedad es el resorte principal de la ciencia y la ingeniería.

La distinción forzamiento/respuesta presentada en el Capítulo 3 divide claramente la exploración de los límites técnicos en dos partes: primero, ¿con qué precisión podemos ajustar el forzamiento radiativo del clima? Y, en segundo lugar, dado cierto nivel de control sobre el forzamiento radiativo, ¿con qué precisión podríamos alterar el clima?

Existen límites físicos simples sobre la medida en que el forzamiento radiativo solar impuesto puede compensar los riesgos de acumulación de carbono; ninguna manipulación de la luz solar, por ejemplo, puede detener la acidificación de los océanos, que es un efecto químico del aumento de las concentraciones de dióxido de carbono.

Por el contrario, no parece haber límites físicos que impidan que una civilización tecnológicamente avanzada adapte el forzamiento radiativo a cualquier nivel deseado de especificidad. Hay, por supuesto, límites a lo que podemos hacer con la tecnología actual y una asignación "razonable" de recursos, pero la tecnología y los recursos son extraordinariamente lábiles durante un siglo. La geoingeniería cruda (sulfatos) es lo suficientemente barata como para que el dinero no sea una restricción importante, pero los métodos más sofisticados y personalizados podrían volverse lo suficientemente caros como para que el costo importe.

Para comprender los límites técnicos, tiene sentido considerar métodos que ahora parecen costosos. Hoy evitamos gastar incluso el uno por ciento del PIB mundial en la reducción de las emisiones de carbono. No sabemos cómo asignarán sus recursos las generaciones futuras: es posible que deseen gastar el uno por ciento del PIB en lugar del 0,01 por ciento en un método de geoingeniería con menos riesgo y mayor eficacia.

Edward Teller y Lowell Wood realizaron el primer esfuerzo sistemático para explorar los límites físicos de la geoingeniería en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore a fines de la década de 1990. Este hecho despertó preocupaciones sobre la participación militar en la geoingeniería. Si bien existe una larga historia de interés militar en el control del clima, estoy razonablemente seguro de que no hay un esfuerzo significativo en geoingeniería.36

Teller y Wood esbozaron una bolsa sorpresa de partículas nanoestructuradas físicamente plausibles que podrían dispersar mucha más luz solar por unidad de masa que una gota de ácido sulfúrico. Estos diseños de dispersión ofrecen ventajas, como la capacidad de adaptar cuidadosamente el forzamiento radiativo y quizás evitar algunos de los efectos secundarios negativos de la geoingeniería de sulfato. La contrapartida es que probablemente serán costosos de producir, y si es necesario renovarlos anualmente, el costo podría ser prohibitivo.

Aproximadamente una década después, comencé a pensar en los límites físicos de los dispersores estratosféricos y me di cuenta de que se podía usar el efecto fotoforético, una parte de la física de principios del siglo XX, para elevar partículas a la atmósfera superior y mantenerlas en un rango de altitud estrecho. La esencia de la idea es que si una partícula está más caliente que el aire que la rodea (como suele ser el caso en la atmósfera superior), las moléculas de aire rebotarán en la partícula un poco más rápido de lo que llegaron.37 El truco es que la probabilidad de moléculas de aire que “sienten” el calor de la superficie no es igual para todas las superficies. Si uno hiciera un pequeño disco con un lado inferior hecho de un material en el que las moléculas de aire tuvieran más probabilidades de "sentir" el calor que el material del lado superior, entonces, en promedio, las moléculas de aire rebotarían en la superficie inferior con mayor velocidad que lo hacen fuera de la superficie superior.

Newton nos enseñó que la acción debe ser igual a la reacción, por lo que habrá una fuerza empujando hacia arriba de abajo hacia arriba. Esto se llama fuerza fotoforética y fácilmente puede ser lo suficientemente fuerte como para mantener una pequeña partícula flotando en la atmósfera superior resistiendo la atracción de la gravedad hacia abajo. Podrías preguntar cómo la partícula mantiene su orientación. ¿Por qué el disco no se voltea y siente la fuerza que lo empuja hacia abajo? La respuesta es que podrías usar un material que se oriente en el campo eléctrico de la Tierra.

En efecto, es una forma de hacer platillos voladores, discos que levitan sin medios aparentes de propulsión, pero lamentablemente los discos no pueden ser mucho más gruesos que un transistor en la CPU de su computadora.

Estos pequeños discos ofrecen varias ventajas potenciales como herramientas para manipular el forzamiento radiativo de la tierra. Podrían estar diseñados para que levitaran sobre la estratosfera, eliminando así el impacto directo sobre la química estratosférica de la capa de ozono. Digo ventajas "potenciales" porque no está claro si se pueden construir y distribuir a un costo suficientemente bajo para que sean útiles.38

Otra ventaja es que reflejan la luz solar de regreso al espacio sin dispersar mucha luz hacia la tierra. Esto soluciona un problema con las gotas de sulfato o cualquier otra pequeña partícula de dispersión más o menos esférica. Todas esas partículas dispersan la mayor parte de la luz que interceptan hacia adelante, hacia la tierra. Para reducir la absorción de la luz solar por parte de la Tierra en un uno por ciento utilizando aerosoles de sulfato, se debe dispersar aproximadamente el nueve por ciento de la luz hacia abajo, reduciendo el haz solar directo (la luz colimada que proyecta sombras nítidas) en un diez por ciento. El efecto neto es similar a tener una alta capa de neblina. Este aumento en la luz difusa de los sulfatos o aerosoles similares da como resultado una serie de efectos sutiles no deseados, desde el aumento de la productividad de la mayoría de los ecosistemas hasta la disminución de la efectividad de las plantas en energía solar para concentrarla. El uso de dispersores no esféricos como los discos elimina este problema.

No es necesario ir a la estratosfera para alterar el forzamiento radiativo del clima. John Latham y sus colegas han desarrollado la idea de usar aerosoles de sal marina muy finos que podrían producirse cerca de la superficie del océano. Se mezclarían hacia arriba en nubes marinas bajas, haciendo que las nubes sean más blancas y tal vez haciéndolas persistir por más tiempo. En la actualidad, la eficacia básica de esta técnica es mucho más incierta que la del sulfato estratosférico. No hay duda de que aumentar el número de núcleos de condensación de nubes, a veces, hará que las nubes sean más blancas y persistentes.

Pero los detalles son horriblemente complejos. No existen modelos que puedan relacionar con precisión la cantidad de partículas de sal marina con el aumento de la reflectividad de las nubes a gran escala en un rango realista de condiciones atmosféricas. En algunas circunstancias, agregar partículas de sal marina puede, paradójicamente, disminuir la reflectividad al romper la continuidad de la capa de nubes.39 Solo puedo concluir que hay un caso muy sólido para la investigación sobre el rocío de sal marina.

Es demasiado fácil para un técnico como yo dejarse atrapar por los detalles técnicos. Y para el lector es demasiado fácil sentirse abrumado. La conclusión es simple. Debido a que uno puede alterar todo el clima con tan solo 10.000 toneladas de dispersión estratosférica súper eficiente, una cantidad que podría levantarse en un mes con un solo avión estratosférico de carga pesada, existe un margen extraordinario para desarrollar nuevas herramientas que permitan una alteración más precisa del forzamiento radiativo. Ninguna de estas tecnologías avanzadas está lista para su implementación inmediata. Es imposible saber si serán relevantes durante el

próximo medio siglo, pero dado el ritmo del progreso tecnológico, parece razonable suponer que si se hace un esfuerzo para encontrar "mejores" formas de alterar el forzamiento radiativo, donde mejor significa un control más preciso en tiempo y espacio y menos efectos secundarios ambientales, entonces es probable que se encuentren dichas mejoras.

Estoy seguro de que eventualmente podríamos encontrar formas "limpias" de alterar el forzamiento radiativo, métodos que tienen efectos secundarios directos insignificantes. La alteración precisa del forzamiento radiativo, por supuesto, no permite contrarrestar con precisión el cambio climático impulsado por los gases de efecto invernadero. “Eventualmente” implica un tropiezo. Los primeros intentos sin duda tendrán problemas, y será posible (aunque aún no está garantizado) converger en un buen método solo mediante el uso de una vía de desarrollo que tenga circuitos de retroalimentación que puedan detectar las malas ideas y corregirlas antes de que causen demasiados problemas.

Permítanme aclarar cuán limitada es mi afirmación para que no se me acuse de ingenuo tecnooptimismo. No estoy afirmando que desarrollaremos necesariamente tales tecnologías. Soy optimista sobre el alcance de la innovación tecnológica, pero soy pesimista (o, creo, realista) sobre la capacidad social para hacer un uso inteligente de las nuevas tecnologías. De hecho, uno puede imaginar fácilmente resultados horribles en los que las tecnologías avanzadas de geoingeniería podrían usarse para la destrucción. Si desarrollamos la capacidad de manipular el forzamiento radiativo de manera económica y efectiva, entonces, en el peor de los casos teóricos, estas tecnologías se pueden usar para crear una Edad de Hielo mundial, una Tierra de bola de nieve como la que existió hace aproximadamente tres cuartos de mil millones de años en el llamado Neoproterozoico.40 Esto es mayor que la perturbación ambiental que podría lograrse con las armas nucleares del mundo. Estas tecnologías brindan a la humanidad una influencia sin precedentes sobre el clima global, y esa influencia puede usarse para bien o para mal. Pero si no los desarrollamos de manera oportuna, podemos sentir las consecuencias absolutas del calentamiento rápido, que podría ser un desastre para muchos cientos de millones de personas y para el entorno natural más amplio del que todos dependemos.

¿Cuántas perillas quieres en tu caja de control de clima?

Supongamos que los ingenieros pudieran construir cualquier cosa físicamente posible en un sistema para controlar el forzamiento radiativo. ¿Qué minimizaría la posibilidad de mal uso, dadas las realidades de la toma de decisiones humanas en un mundo caótico y desigual?

La rápida respuesta a los cambios en el forzamiento radiativo ejemplifica las opciones de diseño en cuestión. Respuesta rápida significa una demora insignificante entre la decisión de rechazar el forzamiento radiativo y la disminución física del forzamiento radiativo neto del clima. Los aerosoles de sulfato, por ejemplo, persisten en la atmósfera durante aproximadamente un año, por lo que la decisión de dejar de agregar azufre se sentirá un año después. Las partículas de vida más larga, como los discos levitantes, responderían más lentamente. En el otro extremo,

considere un sistema de espejos en el espacio diseñado de modo que cada uno pueda rotar cuando se le ordene para que sea perpendicular al Sol (bloqueando la luz solar) o de canto (sin efecto sobre la luz solar). El tiempo de respuesta de tal sistema posiblemente podría ser menos de una hora.

Deje de lado la factibilidad técnica por un momento y pregúntese, ¿qué tiempo de respuesta queremos? Si el mundo estuviera dirigido por una sola entidad racional (piense en Spock), entonces también podría tener una respuesta rápida porque siempre puede elegir girar una perilla de respuesta rápida lentamente, pero sin una respuesta rápida no puede ajustar la perilla rápidamente.

Aún así, no confío en el liderazgo mundial actual con una perilla de control rápida.

La capacidad de desactivar rápidamente el forzamiento radiativo de la geoingeniería a menudo se denomina "el problema de la terminación", pero de hecho es tanto una bendición como una maldición. En igualdad de condiciones, uno quiere un sistema que pueda responder rápidamente a la nueva información. Pero el riesgo no proviene del rápido tiempo de respuesta en sí, sino de su mal uso. Los sistemas políticos son propensos a respuestas altamente no lineales.

Con demasiada frecuencia, no se hace nada mientras un problema lento se acumula lentamente; luego, en ocasiones, de la vorágine surgen decisiones precipitadas.

Los problemas pueden surgir de dos direcciones. Por un lado, los políticos podrían reaccionar de forma exagerada a las indicaciones de que el cambio climático estaba resultando ser peor de lo esperado (imagínese fallas dramáticas en las cosechas en India y Estados Unidos después de un verano particularmente caluroso), activando un sistema no probado demasiado rápido. Por otro lado, si la geoingeniería ya estuviera en funcionamiento, los políticos podrían reaccionar de forma exagerada ante alguna indicación de efectos secundarios peligrosos apagando el sistema tan rápidamente que los daños del cambio rápido en el forzamiento radiativo serían peores que los efectos secundarios recién descubiertos.

Se aplican compensaciones similares al grado de control regional. Si el clima pudiera controlarse de forma independiente en cada región del planeta, estaría bien que cada región eligiera su clima sin una coordinación central.

Pero esto es imposible. Los climas regionales están fuertemente interconectados por flujos de viento y agua que transportan calor y humedad de un lugar a otro. Es físicamente posible imaginar un sistema que permita un control local de acción rápida del forzamiento radiativo, pero esto no permite un control independiente del clima local.

Al igual que con el tiempo de respuesta, un mundo de entidades tranquilamente racionales que podrían negociar compensaciones para beneficio mutuo podría desear tener un control local del forzamiento radiativo. Pero, esta podría no ser una buena elección en nuestro mundo.

Los monzones surgen del contraste entre la tierra cálida y el océano fresco.

A China ya le preocupa que su monzón se esté debilitando, amenazando su capacidad para alimentar a su población. Supongamos que China intentara aumentar la fuerza de los monzones enfriando el Océano Pacífico frente a su costa ajustando el forzamiento radiativo local, tal vez utilizando la técnica de aclaramiento de nubes. Los monzones de Asia están fuertemente interconectados por el flujo de aire a gran escala alrededor del planeta.41

Podría ser que un aumento diseñado en el monzón chino debilite el monzón indio, por lo que el beneficio para China sería una amenaza para India. . ¿Cómo resolveríamos esto? Ambos son estados con armas nucleares. Carecemos incluso de un acuerdo aproximado sobre las normas de gestión del control climático a gran escala, y mucho menos de un mecanismo internacional eficaz para resolver disputas al respecto.

Por lo tanto, podría ser mejor no tener un control local del forzamiento radiativo. Esta es una preocupación con la técnica de aclarado de nubes; es intrínsecamente local y funciona, en todo caso, solo en ubicaciones limitadas con un tipo específico de nubes marinas de bajo nivel. En un mundo dirigido por planificadores centrales bien intencionados, la capacidad de adaptar el forzamiento radiativo utilizando el brillo de las nubes podría ser muy útil para maximizar la eficacia de la geoingeniería solar y reducir los efectos secundarios dañinos.

Pero en el mundo en que vivimos, una tecnología que permita el control regional podría ser más una maldición que una bendición.

Volviendo al tema de este capítulo: el desarrollo de herramientas para la geoingeniería solar no es una actividad pasiva que descubre hechos sobre la naturaleza, aunque sin duda se descubrirán algunos hechos. Más bien, es la aplicación deliberada del conocimiento existente para lograr objetivos específicos. Es ingeniería, no ciencia.

El diseño sensato requiere el aporte del público

Desde el diseño de tostadoras hasta las cabinas de los aviones, los programas de ingeniería ahora intentan enseñar a los jóvenes ingenieros a pensar más allá de los problemas técnicos estrechos y considerar cómo los usuarios interactuarán con sus diseños. Necesitamos construir esta ética en el desarrollo de tecnologías de geoingeniería.

La participación pública no es un espectáculo secundario; debería ser el anillo central de este circo, ya que sin el aporte del público, los objetivos se establecerán implícitamente mediante suposiciones en las mentes de la comunidad técnica limitada que desarrolla la geoingeniería.

Como desarrollador activo de estas tecnologías, sé más sobre ingeniería climática que la mayoría, pero mis valores no deberían contar más ni menos que los de cualquier otra persona. El conocimiento por sí solo no nos dice qué debemos hacer con respecto al cambio climático.

Los científicos que dicen lo que se debe hacer como si sus recomendaciones surgieran de un cálculo objetivo están abusando de la confianza pública. Sus juicios de valor tienen al menos un papel tan importante como los hechos en la determinación de su recomendación.

Dado el mundo tal como es, ¿qué objetivo deberíamos dar a los diseñadores de tecnología de geoingeniería solar? Aunque no es un objetivo, una respuesta completamente plausible es que deberíamos desear que no haya ninguna tecnología de geoingeniería disponible. Supongo que muchas personas desearían que la geoingeniería funcionara si realmente la necesitáramos en alguna "emergencia climática", pero que debería ser de alguna manera inaccesible, colocada en una caja con un letrero que diga "Rompe el vidrio en caso de emergencia" para minimizar la tentación de utilizarlo como sustituto de la acción para reducir las emisiones. En esta línea de pensamiento, el resultado ideal podría lograrse si la comunidad técnica desarrollara silenciosamente la tecnología y al mismo tiempo exagerara públicamente sus riesgos.

Otros pueden decir que estaríamos mejor si se enterrara la geoingeniería.

Detrás de esta opinión, sospecho, se encuentran algunas de las afirmaciones exageradas sobre sus riesgos, como la amenaza que representa para el monzón asiático. Pero si algunos en la élite científica realmente sostienen este punto de vista, es profundamente arrogante. Supone que llegan a conocer verdades que la sociedad no está equipada para manejar y que pueden decidir qué verdades son públicas y cuáles no. Einstein dio la mejor respuesta a esta mentalidad en una cita tallada en una estatua fuera de los EE. UU.

Academia Nacional de Ciencias: “El derecho a buscar la verdad implica también un deber; uno no debe ocultar ninguna parte de lo que ha reconocido como verdadero.”

5

Ética y Política

Esperaba fuegos artificiales en los confines con paneles de madera de un salón de la Universidad de Cambridge cuando ayudé a presentar a Jim Lovelock y Lowell Wood durante la recepción de apertura de una reunión de geoingeniería en 2004. A fines de la década de 1960, Lovelock propuso la hipótesis de Gaia, la idea de que la tierra puede actuar como un único organismo autorregulador. En 1971 fue el primero en detectar la acumulación de ozono destructor de clorofluorocarbonos (CFC) en la atmósfera, y más tarde sus populares libros sobre Gaia lo consagraron como un ícono del ambientalismo. Wood es un físico brillante y ecléctico, ex diseñador de armas nucleares y protegido de Edward Teller, y trabajando con Teller, Wood había escrito un artículo brillante que exploraba la física que forma los límites exteriores de la geoingeniería. Pero ninguna chispa voló cuando los Dres. Gaia y Strangelove se conocieron.

Una de las alegrías de trabajar en este tema es su potencial para crear alianzas donde no las hay. En el evento de Cambridge, Lovelock estaba ansioso por abordar todos los aspectos de la geoingeniería y le dijo a Wood que lamentaba no haber podido conocer a Teller.

También ha creado divisiones, especialmente entre los ambientalistas. Los más visibles son muy críticos: el cineasta Sir David Attenborough lo equiparó con el fascismo y el ecologista canadiense David Suzuki lo calificó de "loco". Voces tranquilas dentro de los principales grupos ambientalistas instan a un apoyo cauteloso para la investigación sobre geoingeniería. Mike Childs de Amigos de la Tierra y el escritor ambiental Mark Lynas se encuentran entre las pocas voces dentro de la comunidad ambiental que defienden públicamente la investigación. Quizás la única iniciativa formal de cualquier grupo ambiental importante ha sido el co-liderazgo de la Gobernanza de Gestión de la Radiación Solar por parte de Environmental Defense.42

Las críticas a la geoingeniería surgen de diversas visiones del mundo y las pasiones son muy intensas. He recibido dos amenazas de muerte que justificaron llamadas a la policía, y recibí muchos comentarios indignados de colegas a quienes respeto. Las críticas más extremas (y las amenazas de muerte) provienen de personas convencidas de la teoría de la conspiración de los chemtrails, que sostiene que el gobierno de los EE. UU. está rociando deliberadamente a sus ciudadanos con toxinas desde aviones. Los creyentes afirman que los metales como el aluminio y el bario se rocían desde aviones comerciales con fines que supuestamente van desde la matanza masiva de la población humana hasta el control mental.43 Estas opiniones son ampliamente compartidas; una sexta parte de los encuestados en una gran encuesta pública que realizamos en Canadá, Gran Bretaña y los Estados Unidos creían que era parcial o completamente cierto que “El gobierno tiene un programa secreto que usa aviones para lanzar químicos dañinos al aire”.44

Nuestra encuesta encontró que es más probable que las personas se opongan a la geoingeniería si son escépticas con respecto a la autoridad del gobierno y se identifican con el extremo derecho del espectro político. Si bien los creyentes de los chemtrails son un extremo, son parte de un continuo que incluye un grupo mucho más grande que cree que los riesgos climáticos están siendo exagerados por la izquierda ambiental como una excusa para justificar una mayor extensión del poder estatal a expensas de las libertades individuales. Para exagerar, esta visión ve a la geoingeniería como una herramienta utilizada por una élite tecnocrática, transnacional e impía que ha inventado tanto la amenaza climática como la respuesta de la geoingeniería como un medio para extender su poder.

A la izquierda, la queja central sobre la geoingeniería es que presenta una solución técnica temporal e ilusoria, que alienta a la sociedad a alejarse de las reformas sociales necesarias. Los intereses corporativos explotarán la geoingeniería para obtener ganancias y como un medio para defender el statu quo económico del que dependen. Clive Hamilton, un crítico de tendencia izquierdista de la geoingeniería cree que "los conservadores lo ven como una reivindicación del sistema", que el mercado y la innovación tecnológica resolverán nuestros problemas, mientras que "es el sistema político y económico… lo que tenemos que cambiar. "45 Exagerando nuevamente, si la causa raíz de los males ambientales es el consumo excesivo impulsado por el capitalismo industrial, entonces las soluciones deben ser reformas sociales fundamentales, no nuevas tecnologías que simplemente nos dan más espacio para respirar.

No es un riesgo moral

La preocupación de que la geoingeniería nos anime a evitar decisiones difíciles sobre la reducción de la contaminación por carbono se denomina comúnmente y de manera inexacta riesgo moral.

El riesgo moral, tal como se define en economía, surge cuando las personas están protegidas de los malos resultados de una actividad arriesgada pero deseable, de modo que asumen más riesgos de los que aceptarían si estuvieran pagando el costo total. Obtienen un pase gratis; pero el costo finalmente recae en otros.

La presencia de un seguro federal contra inundaciones subsidiado, por ejemplo, alienta a las personas a construir (y reconstruir) en zonas inundables porque no pagan los costos del seguro que reflejan la probabilidad real de inundaciones devastadoras.

Se está mejorando su bienestar, pero no el bienestar social: una persona que compra en la zona inundable está respondiendo con sensatez al hecho de que obtiene los beneficios de vivir cerca del río mientras se protege de algunos de los costos. Pero la sociedad está peor porque los costos reales de vivir en una llanura aluvial superan los beneficios derivados de vivir cerca del río.

Aunque introduje el término en el debate de la geoingeniería,46 no creo que el riesgo moral haga un buen trabajo al capturar la preocupación de que la geoingeniería debilitará los esfuerzos para reducir las emisiones. Con la geoingeniería, se podría decir que las generaciones actuales obtienen el pase libre mientras que las siguientes generaciones pagan el costo total, pero esto entierra la tensión entre el bienestar individual y social y, por lo tanto, se aleja de la intención original del riesgo moral y oscurece la probabilidad de que las generaciones futuras sufrirán más por nuestras emisiones que por la geoingeniería, ya que el impacto del carbono dura mucho más que cualquier forma de geoingeniería contemplada hasta ahora. Algunos usan el riesgo moral para expresar preocupaciones de que los poderosos obtengan el pase mientras que los pobres pagan el costo total. Si bien las preocupaciones sobre la desigualdad son y deberían ser centrales en el debate sobre la geoingeniería, es engañoso equiparar la desigualdad y el riesgo moral.

La compensación de riesgos parece un mejor análogo de comportamiento para los temores de que la geoingeniería nos lleve más profundamente a la trampa del carbono y el clima. La compensación del riesgo es un cambio en el comportamiento hacia una mayor exposición al riesgo después de que el riesgo se haya reducido mediante alguna solución técnica. Un ejemplo definitorio de la compensación de riesgos fue la observación de que las muertes por accidentes de tránsito disminuyeron menos de lo esperado luego de la introducción de los cinturones de seguridad, quizás porque los conductores con cinturones iban un poco más rápido. Un ejemplo particularmente sorprendente fue un estudio que encontró que los conductores tienen un 40 por ciento más de probabilidades de conducir cerca de ciclistas que usan cascos que aquellos que no los usan.47 Aquí el ajuste de comportamiento no lo hace el ciclista que adoptó la solución técnica para reducir el riesgo, sino más bien una segunda parte, el conductor, cuyas acciones imponen un riesgo al ciclista. Esto es adecuado porque es nuestra generación la que puede emitir más carbono y, por lo tanto, imponer más riesgo climático a las generaciones futuras porque anticipamos que su riesgo se reducirá con la geoingeniería futura (el equivalente generacional de ponerse un casco de bicicleta).

La compensación del riesgo no es irracional. Si uno obtiene placer del sexo arriesgado o de los autos rápidos, y las medidas de protección le permiten obtener un poco más de placer sin riesgo adicional, entonces la compensación del riesgo es una respuesta sensata.

La mayoría de nosotros tenemos alguna experiencia personal con este fenómeno. La existencia de maravillas como los teléfonos satelitales y las chaquetas de Gore-Tex me permite hacer viajes más difíciles, adentrarme más en la naturaleza de lo que me atrevería de otro modo. Soy más cauteloso, y más alerta y vivo, cuando realizo un viaje de invierno solo en las montañas que cuando tengo un teléfono satelital y sé que hay un rescate cerca.

La expectativa de que las personas ajusten su comportamiento no constituye un argumento en contra de la introducción de tecnologías de reducción de riesgos; simplemente significa que el riesgo se reducirá menos de lo que uno podría predecir usando un cálculo que ignorara el

cambio de comportamiento. Sería extremadamente perverso argumentar que la compensación de riesgos justifica la retención de preservativos o cinturones de seguridad.

De manera similar para la geoingeniería: en igualdad de condiciones, espero que un mundo donde la geoingeniería se pruebe y esté disponible será uno que gaste menos en reducir las emisiones que un mundo donde se sabía que la geoingeniería era imposible.

La discusión franca sobre la compensación de riesgos es rara. He servido en varios comités de alto perfil que tenían como objetivo articular puntos de vista de consenso formales sobre la geoingeniería. Cada uno trabajó arduamente para asegurar a su audiencia que la investigación sobre geoingeniería no debería desviar de ninguna manera la atención de la reducción de emisiones. El informe del Bipartisan Policy Center decía: "Este grupo de trabajo cree firmemente que las tecnologías de remediación climática no reemplazan el control del riesgo a través de la mitigación climática"; y, el "Mensaje número uno" de la Iniciativa de Gobernanza de la Gestión de la Radiación Solar fue que "Nada de lo que se sabe ahora sobre SRM proporciona una justificación para reducir esfuerzos para mitigar el cambio climático mediante la reducción de las emisiones de GEI, o esfuerzos para adaptarse a sus efectos."48

Veo estas declaraciones como (en el mejor de los casos) confusas. ¿Por qué? Sin duda, están motivados por una convicción bien intencionada de que la humanidad está haciendo muy poco para reducir las emisiones frente a la amenaza climática, una convicción que comparto inequívocamente. Pero el hecho de que deberíamos reducir las emisiones para transmitir menos riesgos climáticos de carbono a nuestros nietos no justifica las afirmaciones de que sería incorrecto que la humanidad alterara su comportamiento si la geoingeniería proporciona una reducción significativa del riesgo climático.

El objetivo fundamental de la política climática convencional es mejorar el bienestar humano al equilibrar los costos de reducir las emisiones con los daños del cambio climático. Aunque personalmente no me convence este marco utilitario, es una pieza central del análisis de la política climática. Si acepta el punto de vista utilitario, entonces se compromete a aceptar la consecuencia de que si se reduce el riesgo climático, la política debería reflejar ese cambio al reducir la reducción de las emisiones. La matemática es simple e inevitable: menos riesgo significa menos recursos gastados para asegurarse contra el riesgo. Esto es tan cierto si dios hablara desde las nubes (¿desde dónde más hablaría sobre este tema?) anunciando que ha reducido la sensibilidad del clima al dióxido de carbono, como si los simples mortales lograran una versión imperfecta y parcial del mismo efecto inyectando aerosoles en la estratosfera.

Si uno quiere mantener que no debería haber compensación de riesgos, que deberíamos trabajar lo más duro posible para reducir el carbono independientemente del potencial de la geoingeniería, entonces uno debe adoptar otro marco para la política climática. Es tentador argumentar que la geoingeniería es tan incierta que la mera posibilidad no debería influir en nuestro comportamiento, pero este argumento es insostenible. La maquinaria analítica del análisis de políticas climáticas está bien equipada para hacer frente a la incertidumbre en los costos de reducir las emisiones o los riesgos del cambio climático.49

Es tan tonto afirmar que la geoingeniería debe influir en la política solo si es seguro que funcionará como afirmar que debemos reducir las emisiones solo si los impactos climáticos se pueden predecir con certeza.

La geoingeniería que solo es débilmente efectiva aún cambia la política utilitaria hacia una menor mitigación, al igual que las aseguradoras cobran primas más bajas si instala detectores de humo, a pesar de que reducen, pero no eliminan, la posibilidad de un incendio catastrófico.

Este argumento podría parecer perder el punto. Existe una gran brecha entre el progreso real que se está logrando para restringir las emisiones y los recortes prescritos por los analistas de políticas climáticas. Sospecho que el temor de que la discusión pública sobre la geoingeniería haga más difícil cerrar esa brecha es la base más importante para la oposición a la investigación de la geoingeniería. Justificado o no, este temor es distinto de la preocupación de que, si el mundo siguiera una política utilitaria racional, la viabilidad de la geoingeniería significaría menos mitigación.

No existe un argumento simple que demuestre que la geoingeniería ampliará la brecha entre el ser y el deber ser. Tal vez al hacer que los riesgos climáticos parezcan más manejables y más peligrosos, la geoingeniería sacudirá la política obsoleta del cambio climático y acelerará la acción. En cualquier caso, no hay base para afirmaciones simplistas de que la geoingeniería no debe alterar la cantidad de emisiones que deben reducirse.

Confusión moral sobre la desigualdad

El corazón del argumento de la compensación de riesgos contra la geoingeniería es que debemos renunciar a la curita y resistir mientras nos enfocamos en soluciones a largo plazo, porque el uso de la geoingeniería reduciría los impactos climáticos a corto plazo y, por lo tanto, reduciría nuestro compromiso de reducir las emisiones.

Este argumento se vuelve más perturbador desde el punto de vista ético cuanto más se piensa en la forma en que el riesgo y la responsabilidad se dividen entre nosotros y nuestros nietos, y entre ricos y pobres.

Es extraño incluso si se considera un mundo imaginario, homogéneo, democrático y sin desigualdad. Recordemos cómo la dinámica lenta del ciclo del carbono separa las emisiones de sus impactos. En pocas palabras, reducir las emisiones reduce el riesgo climático para nuestros nietos, pero no hace nada por nosotros.

La geoingeniería hace lo contrario. Reduce los riesgos climáticos para la generación que lo usa, si es que funciona, pero no hace nada para reducir los riesgos que nuestras emisiones imponen a las generaciones futuras.

Deberíamos reducir las emisiones ahora para reducir el riesgo climático que imponemos en el futuro. Pero esto no es un argumento contra lo simultáneamente utilizando por otros medios

para reducir nuestro dolor a corto plazo. Si lo fuera, ¿por qué no llevar el argumento a su absurda conclusión? Si el dolor actual es un acicate efectivo para el comportamiento correcto, entonces más dolor debería ser mejor. ¿Deberíamos encontrar formas de utilizar la energía fósil que impongan daños adicionales a la generación actual para que estemos aún más motivados a ayudar a nuestros descendientes? Podríamos renunciar al uso de tecnología comprobada para limitar la contaminación del aire por partículas mortales de las centrales eléctricas de carbón, incluso cuando el costo del control de la contaminación es mucho menor que el costo monetario puro de la muerte y la enfermedad que causan. Como política deliberada, esto sería estúpido e inmoral (aunque en la práctica es exactamente lo que está sucediendo en los Estados Unidos y, de manera más flagrante, en China50).

Esto es una tontería evidente, pero se pone peor. Si el argumento de que no hay curitas es una falacia para un mundo homogéneo, se vuelve verdaderamente repugnante cuando se aplica al mundo en que vivimos. La mayoría de las emisiones provienen de los ricos. La mayor parte de la carga inmediata a corto plazo del cambio climático recaerá sobre los pobres y, del mismo modo, son los pobres, dado que son los más vulnerables al cambio climático, quienes tienen más probabilidades de beneficiarse de cualquier reducción a corto plazo del riesgo climático que ofrezca la geoingeniería.51 Sin embargo, la mayoría de los que argumentan que debemos ignorar la geoingeniería porque nos desviará de las soluciones "verdaderas", como la reducción de emisiones o un cambio social profundamente arraigado, son ricos y educados. Así que tenemos la desagradable perspectiva de que los ricos argumenten que debemos rechazar la tirita de la geoingeniería, negando así lo que puede ser un gran beneficio para los pobres, para incitar a los ricos a reducir las emisiones.

Las organizaciones de defensa del mundo desarrollado, como el Grupo ETC, el grupo más eficaz que se opone a la investigación en geoingeniería, afirman hablar en nombre de los pobres y vilipendian a quienes defienden la investigación en geoingeniería.52 Argumentan que las mejores soluciones son volver a "sistemas agrícolas liderados por campesinos" para "garantizar la seguridad alimentaria global y la supervivencia del planeta".

El abrazo romántico de lo primitivo es siempre una respuesta tentadora a la impotencia que muchos sienten frente a la globalización. Sin embargo, la dura realidad física es que, a pesar de los fracasos muy reales de la agroindustria moderna, la productividad de la antigua agricultura dirigida por campesinos es mucho menor que la lograda con la agricultura tecnológica moderna; si el mundo hiciera retroceder el reloj agrícola, gran parte de la población mundial moriría pronto de hambre. Además, del ciclo del carbono la inercia dicta que incluso las emisiones agresivas harán poco para abordar el calentamiento que probablemente dañará los cultivos por estrés térmico en el próximo cuarto de siglo, con pérdidas de cultivos resultantes que pondrán en riesgo a millones de los más pobres.

Esto es confusión moral, no riesgo moral. Los recortes de emisiones y la geoingeniería no son alternativas intercambiables. Debemos reducir las emisiones si queremos evitar pasar los riesgos de nuestra energía barata a las generaciones futuras. Esa es la dura y simple verdad. Incluso si

la geoingeniería puede reducir los riesgos en el futuro, sigue siendo cierto que las emisiones actuales aumentan ese riesgo, por lo que la geoingeniería no puede absolvernos del deber de limitar nuestras emisiones.

Que las emisiones de hoy pasen una carga al futuro no implica de ninguna manera que debamos renunciar a la posibilidad de utilizar la geoingeniería para limitar el daño que las emisiones de generaciones pasadas han impuesto en el presente.

Este argumento solo se ve reforzado por el hecho de que las emisiones y el uso de energía provienen principalmente de los ricos, mientras que las cargas del cambio climático recaen con mayor fuerza sobre los pobres, quienes también se beneficiarán más de la geoingeniería (si funciona) cuando reduzca estas cargas.

FINES Y MEDIOS

Supongamos que es cierto que una combinación de geoingeniería y recortes de emisiones podría hacer un mejor trabajo para limitar los riesgos ambientales del cambio climático, como la extinción de especies adaptadas al frío por el rápido calentamiento del Ártico, que los recortes de emisiones por sí solos. Supongamos además que los beneficios de la geoingeniería van principalmente a los pobres. (Dado que los impactos a corto plazo del cambio climático, como el estrés por calor, las inundaciones y las malas cosechas, recaen de manera desproporcionada sobre los más pobres del mundo, se deduce que los beneficios de reducir el cambio climático irán a las personas con la menor capacidad para hacer frente a los problemas ambientales. estrés, a saber, los pobres.)

Si la geoingeniería puede proteger a los vulnerables y al entorno natural, ¿por qué entonces existe una oposición tan fuerte a la geoingeniería por parte de la izquierda política? La respuesta es a la vez obvia y oscura.

Desde la década de 1960, la izquierda ambiental ha desarrollado un conjunto de supuestos ampliamente aceptados sobre las características que marcan las buenas soluciones para problemas ambientales. Incluyen una preferencia por lo local sobre lo global, desde la agricultura apoyada por la comunidad hasta el empoderamiento de los pueblos indígenas en el manejo de los bosques tropicales; una preferencia por eliminar los contaminantes cambiando los procesos industriales en lugar de usar tecnologías de limpieza al final del proceso; y finalmente, una preferencia por las soluciones sociales sobre las tecnológicas. La geoingeniería viola cada uno de estos supuestos y en ese sentido su rechazo no sorprende.

La activista Naomi Klein, por ejemplo, condena la geoingeniería como una "propuesta deshonesta", ya sea a través de energía renovable controlada por la comunidad, agricultura orgánica local o sistemas de tránsito que genuinamente rindan cuentas a sus usuarios” el petróleo “nos metió en este lío”. Para elegir solo un ejemplo de pensamiento confuso, la agricultura orgánica local hace poco o nada para reducir las emisiones; de hecho, puede tener emisiones más altas que la agricultura industrial moderna.55 Es difícil no sospechar que los

medios y los fines se han invertido, que Klein conoce el resultado político que favorece y simplemente se ha aferrado a la amenaza climática como una forma de avanzar.

La tensión entre medios y fines es marcada: si el problema es que los impactos climáticos recaen injustamente sobre los pobres y los políticamente débiles, ¿por qué entonces la solución es el control de emisiones y no medidas específicas para reducir la pobreza y empoderar a los débiles? Sería difícil argumentar que el control global de emisiones es una herramienta efectiva para combatir la pobreza, por lo que sospecho que la razón por la que Klein favorece el control de emisiones es como un medio para debilitar el poder de los ricos y no como una forma efectiva de ayudar a los pobres.

El cambio climático obliga a hacer concesiones difíciles. ¿Estamos tratando de proteger a los agricultores de subsistencia amenazados por la sequía o a los neoyorquinos amenazados por el aumento del nivel del mar? ¿Osos polares o campos de trigo? Es tentador responder: "Todo lo anterior". Tentador pero simplista. Reducir las emisiones limitará el riesgo climático para las generaciones futuras, pero aumentará los costos energéticos actuales, y los pobres de hoy sentirán más el dolor. Las compensaciones surgen porque habrá ganadores y perdedores a medida que cambie el clima, y también porque reducir las emisiones no es la única forma de limitar los riesgos de un mundo que se calienta. El esfuerzo sostenido para reducir las emisiones, después de muchas décadas, reducirá el riesgo de sequía para los agricultores vulnerables, pero los riesgos que enfrentan los agricultores por el cambio climático también pueden reducirse mejorando el riego o cultivando cultivos que prosperen en climas cálidos. Muchas de estas acciones locales pueden ayudar a las personas a adaptarse a un clima cambiante.

Una explicación más profunda para el rechazo de la geoingeniería por parte de muchos en la izquierda verde radica en el hecho de que los ambientalistas han fusionado dos causas diferentes: derogar los excesos del capitalismo agresivo y minimizar el daño al medio ambiente.

Quiero acción en ambos, pero mientras están conectados, no veo un estrecho vínculo de uno a uno entre ellos.

¿Debemos arreglar el capitalismo para arreglar el clima? Cualquier argumento serio a favor de esta proposición debe confrontar el hecho de que las democracias occidentales han logrado un enorme progreso en el manejo de los problemas ambientales durante el último medio siglo. Para citar solo dos ejemplos, la reducción de la contaminación del aire por el sistema regulatorio basado en la Ley de Aire Limpio de los EE. UU. ha mejorado la calidad del aire incluso cuando la población y la riqueza han aumentado. Esta no fue una victoria menor. Estas regulaciones impusieron costos que alcanzaron un máximo de casi el 1 por ciento de la economía estadounidense. Se opusieron a ellos poderosos intereses corporativos, y la batalla política para promulgarlos fue larga y feroz. Los beneficios en forma de mejora de la salud superan con creces el costo, y en muchas ciudades estas regulaciones han mejorado la esperanza de vida en casi un año. La lucha no ha terminado, pero las victorias son reales y deben celebrarse. Una restricción global sobre los clorofluorocarbonos que destruyen el ozono proporciona un segundo ejemplo, y quizás más impresionante, porque exigió una acción global coordinada y ha logrado reducir las emisiones globales a cero.

Clive Hamilton argumenta que los científicos norteamericanos como yo aportamos “una visión del mundo distintivamente estadounidense a la geoingeniería”56 que él contrasta con más puntos de vista ambientales en Europa. Si bien hay algo de verdad en esto, vale la pena recordar que Estados Unidos ha estado a la cabeza de Europa en la mayoría de las principales leyes ambientales (aunque podría decirse que ese liderazgo se ha invertido en las últimas dos

décadas) y que todavía está a la cabeza en investigación climática y como centro mundial de Activismo climático no gubernamental. Si bien es retóricamente conveniente para Hamilton equiparar a los Estados Unidos con el poder corporativo, el anti-ambientalismo y el apoyo incondicional a la geoingeniería, uno podría, de hecho, con la misma base, vincular el liderazgo en ciencias ambientales y activismo con el interés de su comunidad científica en la geoingeniería.

El aumento de la desigualdad y la pérdida de movilidad social en los Estados Unidos son ejemplos apremiantes de la necesidad de una reforma política y económica, pero sostener las afirmaciones de que una respuesta eficaz al cambio climático requiere una reingeniería fundamental del capitalismo de mercado es negar el hecho de que Las economías liberales de mercado han hecho un mejor trabajo de regulación ambiental que sus competidores.

Es hora de que los defensores del medio ambiente reexaminen algunas viejas suposiciones.

¿Deberíamos preferir lo local a lo global? Es un argumento extraño para la izquierda. Después de todo, la esencia de resolver problemas de bienes comunes globales como el cambio climático es obligar a las comunidades locales a reducir sus emisiones para lograr un bien global compartido, aunque sea en interés de cada comunidad usar esa atmósfera como un vertedero de carbono. El imperativo de que el bien público global triunfe sobre la autonomía local es la razón por la cual los grupos ambientalistas han invertido tanto esfuerzo en un tratado climático global.

Podría decirse que los argumentos a favor de la autonomía local provienen más naturalmente de la tensión libertaria de la derecha política, una perspectiva que convierte en una paradoja la preferencia de la izquierda ambientalista por lo pequeño es hermoso.

¿Deberíamos preferir la reingeniería del proceso de producción para eliminar los contaminantes en lugar de la limpieza final? Green Chemistry ha hecho grandes progresos utilizando este enfoque. Para mí, parece una regla general sabia y una base sólida para el escepticismo de tecnologías como la captura de carbono y la geoingeniería. Pero el escepticismo no debería significar una oposición rígida si estas tecnologías ofrecen beneficios ambientales reales sobre sus alternativas.

Finalmente, ¿deberíamos preferir las soluciones sociales a las técnicas? Uno puede discutir cualquier lado, pero cualquiera que prefiera, es difícil evitar la conclusión de que la mayoría de las grandes victorias ambientales del último medio siglo han sido arreglos tecnológicos. La contaminación del aire se redujo utilizando convertidores catalíticos, no compartiendo vehículos; la capa de ozono se salvó cambiando los refrigerantes sin volver a los sótanos; y

los halcones peregrinos se salvaron del DDT mediante el desarrollo de insecticidas menos propensos a la bioacumulación.

No estoy defendiendo el capitalismo de laissez-faire. Por el contrario, me gustaría ver leyes ambientales mucho más estrictas y un precio del carbono lo suficientemente alto como para

eliminar rápidamente los negocios con alto contenido de carbono. Llegar a tal victoria ambiental requerirá un nuevo y poderoso movimiento social. De hecho, mirando hacia atrás, uno podría dar la vuelta a mi afirmación de que las victorias ambientales históricas son tecnológicas al argumentar que la tecnología nunca habría surgido sin el auge del ambientalismo y la creciente desconfianza en el poder corporativo en la década de 1960 que impulsó la aprobación de las leyes, leyes que a su vez impulsaron a la industria a adoptar los arreglos técnicos que en última instancia protegieron el medio ambiente. Klein explica correctamente cómo el dinero corporativo difunde la negación climática para bloquear la acción.

El vínculo entre restringir el capitalismo agresivo y minimizar el daño al medio ambiente surge, en mi opinión, no porque el liberalismo político y económico sea inherentemente antiambiental, sino porque la acumulación de poder corporativo y dinero político privado ha frustrado la capacidad del gobierno para actuar en el interés público

Riesgo, investigación y bloqueo

Incluso si acepta que las preocupaciones sobre el riesgo moral y la desigualdad no proporcionan argumentos sólidos en contra de la geoingeniería, sin embargo, puede sentir que la geoingeniería oculta algo feo debajo de la alfombra. Me preocupa la tendencia de nuestra cultura a sobreestimar el poder de las nuevas tecnologías mientras se restan importancia a sus riesgos y por la tendencia humana actual a festejar mientras pospone la limpieza. Estos pueden ser los argumentos más fuertes para la cautela.

Quizás el argumento más común contra la geoingeniería es simplemente que no funcionará o que los riesgos superarán los beneficios. Aunque esto a menudo se incluye en argumentos moralistas, es una afirmación empírica. Y bien puede resultar cierto. Si la pregunta fuera "¿deberíamos comenzar la geoingeniería a gran escala hoy?" entonces la incertidumbre sería un argumento convincente en contra de empezar. Pero ninguna persona sensata aboga por un compromiso inmediato con la geoingeniería a gran escala.

La pregunta en cuestión no es la implementación inmediata, sino si se debe o no comenzar un programa de investigación serio que tenga mecanismos sólidos para la revisión independiente y esté acompañado del desarrollo de mecanismos de gobernanza que puedan permitir decisiones legítimas sobre investigación e implementación a mayor escala.

Se podría argumentar que la posibilidad de que la geoingeniería resulte útil es tan pequeña que no vale la pena financiar la investigación. Es cierto que no podemos financiar todas las ideas descabelladas; uno debe equilibrar la posibilidad de éxito contra el costo.

Pero parece particularmente probable que la investigación reduzca la incertidumbre en el caso de la geoingeniería porque se ha realizado muy poco trabajo serio y relativamente pocas de las herramientas bien desarrolladas que podrían mejorar la comprensión para aplicar al problema. Además, el costo es relativamente pequeño: los beneficios potenciales en la reducción de los daños climáticos se miden en cientos de miles de millones por año, mientras que el costo de un

programa de investigación de una década que mejoraría sustancialmente la comprensión se mide en decenas de millones.57

Un argumento mucho más fuerte en contra de la investigación es el potencial de bloqueo institucional que podría hacer imposible renunciar a la geoingeniería a gran escala una vez que la investigación adquiera impulso. Esta es una preocupación seria. Una vez establecidos, los intereses comerciales en la geoingeniería sin duda defenderán la necesidad de continuar, utilizando cualquier medio disponible, desde el cabildeo oculto hasta la fiinanciación de la ciencia que se inclina hacia ellos.

El potencial de bloqueo no se limita al sector privado, por lo que incluso la eliminación de la investigación privada no puede evitar el riesgo. Las instituciones gubernamentales tienen un impulso casi orgánico de autopreservación que las lleva a exagerar el problema original o a crear nuevas misiones mucho después de que su mandato original haya quedado obsoleto. Los académicos defienden sus posiciones literalmente hasta la muerte, aunque la academia en su conjunto puede ser menos susceptible al encierro porque los individuos ganan grandes recompensas al matar vacas sagradas.

Para mí, el encierro institucional es el único argumento fuerte en contra de la investigación de bajo riesgo, pero no es una razón suficiente para abandonar la investigación. Más bien, es un estímulo para hacer todo lo que podamos para contrarrestar tales efectos de bloqueo. Necesitamos crear nuevas normas y desarrollar reglas como la restricción de patentes que excluyan los intereses comerciales de las tecnologías centrales. La competencia y la diversidad son la mejor defensa contra el encierro. Deberíamos evitar el dominio de instituciones de investigación de un solo gobierno y, en cambio, construir un conjunto culturalmente diverso de esfuerzos de investigación y gestión, con muchos dedicados explícitamente a descubrir todas las formas en que la geoingeniería no funcionará.

DESIGUALDAD Y GEOPOLÍTICA

Una vez desarrolladas, las tecnologías de la información, la manipulación de la línea germinal humana y la geoingeniería son relativamente económicas de usar y replicar.

Cada uno tiene la capacidad de reformar profundamente el orden social. Cada uno tiene una enorme influencia en el sentido de que, una vez que se conoce la idea, pequeños aportes de materiales y mano de obra pueden generar una gran producción. En cada caso, será difícil para las naciones o corporaciones que desarrollan estas tecnologías mantener el control sobre su difusión y uso.

Estas tecnologías difieren profundamente en que los países o grupos sociales pueden, dentro de ciertos límites, tomar decisiones distintas sobre la adopción. Algunos pueden renunciar o controlar aspectos de la tecnología de la información, mientras que otros la aceptan. Algunos pueden optar por permitir que los padres manipulen los genes de sus hijos, mientras que otros restringen la práctica. La geoingeniería es diferente.

Los climas locales están tan estrechamente acoplados a sus vecinos por flujos de energía y humedad que el control local es inverosímil. La geoingeniería parece exigir un control centralizado. Pero, ¿de quién será la mano en el termostato?

La gestión de la geoingeniería exige una gobernanza global e inevitablemente cambiará el equilibrio de poder. Gran parte de la retórica sobre la política de la geoingeniería supone que reforzará el poder de los fuertes sobre los débiles, de Estados Unidos y Europa sobre el sur global. Si bien esto es posible, lo contrario parece igualmente probable. Como una tecnología de alto apalancamiento para la cual la protección de la propiedad intelectual y el secreto probablemente tengan poco valor, el conocimiento sobre cómo implementar la geoingeniería se extenderá a nivel mundial, independientemente de dónde se origine.

La implementación de la geoingeniería requiere tanto conocimientos como herramientas.

Si bien las herramientas pueden parecer exóticas, la mayoría de las tecnologías (aviones de gran altitud y tecnologías de dispersión simple) podrían ser producidas por un número sorprendente de países dentro de una década. Todos los países del G20 cuentan con amplios recursos financieros, técnicos e institucionales para desarrollar e implementar las herramientas necesarias. La tecnología necesaria para construir un avión que pueda transportar cargas útiles a la estratosfera inferior es mucho menos sofisticada que la necesaria para construir un avión de combate avanzado. El trabajo se puede lograr de manera efectiva con tecnología de aviones a reacción bastante convencional.

Muchas naciones menos ricas tienen amplios recursos financieros e institucionales para adquirir y controlar las herramientas incluso hacerlas ellos mismos. Supongamos, por ejemplo, que la Alianza de Pequeños Estados Insulares, un grupo que ha desempeñado un papel importante en la política climática, decidiera aunar recursos y comenzar a trabajar. Podían elegir entre muchos proveedores confiables desde Hindustan Aeronautics Limited hasta Embraer de Brasil. El costo de desarrollar la capacidad ascendería a menos del 1 por ciento de su PIB durante una década.

Cualquier potencia militar importante podría, por supuesto, impedir que un país pequeño despliegue dicha tecnología, ya sea mediante la amenaza de la fuerza o la fuerza misma. La credibilidad de esa amenaza dependería, como siempre, de la medida en que el estado o el grupo de estados que deseaban comenzar con la geoingeniería podrían reclutar aliados, tal vez construyendo un caso creíble de que estaban actuando legítimamente para proteger sus propios intereses sin daño indebido a las naciones fuera de la coalición.

En cualquier caso, el hecho de que la mayoría de las naciones puedan acceder fácilmente a estas tecnologías y que impedir el despliegue requiera algo a nivel de embargo o fuerza militar es una señal segura de que la geoingeniería es una tecnología de nivelación en el mismo sentido ambiguo que Internet o armas nucleares. Si se trata de una lucha de poder entre naciones por el control del clima, la geoingeniería actúa para difundir el poder lejos de las naciones más ricas y poderosas a un grupo mucho más grande de estados más débiles. Al igual que otros niveladores, en particular la proliferación nuclear, este hecho es perturbador en su potencial para conducir a un conflicto internacional.

La geopolítica puede ser el más difícil de todos los desafíos planteados por la geoingeniería. Cuando considero escenarios de geoingeniería que conducen a un desastre total, o escenarios opuestos en los que la geoingeniería se abandona prematuramente a pesar de sus beneficios sociales y ambientales, todos implican fallas geopolíticas.58

6

Perspectiva

La ciencia y la tecnología, como todas las creaciones originales del espíritu humano, son impredecibles.

Si tuviéramos una forma confiable de etiquetar nuestros juguetes como buenos y malos, sería fácil regular la tecnología de manera inteligente. Pero rara vez podemos ver lo suficientemente lejos para saber qué camino conduce a la condenación quien se preocupa por la gran tecnología, ya sea para impulsarla o para detenerla, está apostando en vidas humanas.

–Freeman Dyson, Perturbando el Universo (1981)

Los asientos en clase ejecutiva miran hacia adentro, lejos de las ventanas.

Levantando la vista de mi trabajo, me retuerzo en mi asiento luchando por abrir la persiana. La luz entra a raudales, lavando la película de mi vecino. Como derramar el vino “gratis”, es un error social dejar que la luz del sol perturbe el mundo artificial de un vuelo transpacífico.

Al principio solo veo una capa de nubes. Luego me quedo paralizado cuando miro directamente hacia abajo a través de un hueco en la cubierta de nubes hacia una cara festoneada de roca y nieve que se sumerge en un bergschrund y luego sale a un glaciar que fluye entre paredes de roca cubierta de nieve. Entonces, tenuemente, en el borde de la percepción, aparece un río trenzado a través de las nubes cada vez más finas. Las vistas se vuelven mágicas por la burla de la nube, como con la ropa que revela a medias el cuerpo debajo.

Quiero salir quiero caminar por los matorrales de alisos a lo largo del río trenzado. He tenido la suerte de pasar mucho más tiempo del que me corresponde al aire libre, pero como un adicto, la vida salvaje solo alimenta mi deseo de más. Hace tres años esquié durante tres semanas en la costa norte de la isla de Baffin. Hace décadas, un amigo y yo nos tiramos a la hierba cubierta de musgo después de caminar como locos por las montañas Talkeetna al norte de Anchorage en el mismo paisaje que ahora contemplo. Embriagados por la alegría pétrea de la escalada alpina en los límites del control, Curt y yo comimos bayas como hacen los osos, escurriéndolas de los arbustos con los dientes. País salvaje.

Ahora, estoy volando a Corea para una reunión del IPCC donde hablaremos sobre el clima, la naturaleza y la geoingeniería usando solo palabras secas en una habitación seca. He pasado largas noches ajustando el Fortran de los modelos climáticos cuando podría haber estado de fiesta. He visto pasar horas y días en salas de reuniones estériles cuando intentaba convencer a los ejecutivos y políticos de energía para que se tomaran en serio la reducción de emisiones cuando podría haber estado en el bosque con la lluvia en la cara. ¿Por qué?

Mis colegas y yo a menudo argumentamos que el dinero gastado para reducir las emisiones se devolverá en daños climáticos reducidos. Este no es un argumento académico incidental; más bien, es el marco económico canónico de la política climática, la suposición fundamental de innumerables documentos y resúmenes de políticas. De acuerdo con esta lógica, mis esfuerzos para promover la acción climática han sido un medio para hacer que el mundo sea un poco más

rico en 2100 al ahorrar dinero en los impactos climáticos. Confieso que no soy creyente. Encuentro esta justificación utilitária para la política climática absolutamente poco convincente. Espero que los recortes de emisiones brinden un beneficio económico neto, pero aun así me gustaría reducir las emisiones incluso si hacerlo nos empobreciera.

En 1974, el académico constitucional Laurence Tribe se dedicó brevemente a los asuntos ambientales en un artículo, "Maneras de no pensar en los árboles de plástico", que fue provocado por la instalación de árboles de plástico en la mediana de una autopista de Los Ángeles. Tribe especuló que a medida que construimos mundos artificiales, nuestros hijos crecerán cada vez más contentos dentro de ellos, de modo que el interés por la naturaleza se desvanecerá. Los valores cambian con las elecciones.

Nuestra riqueza ahora crece mucho más rápido que nuestras emisiones de carbono, por lo que cada vez es más fácil reducir nuestra huella de carbono. Durante este siglo podríamos reducir las emisiones a cero a costa de unos pocos años de crecimiento económico. Sin embargo, me temo que Tribe lo logró. Un mundo en el que los ricos vuelan sobre un país mágico mientras miran hacia adentro viendo pantallas de video en la oscuridad no es un mundo que valore la naturaleza.

Dudo que podamos elaborar planes sensatos para gestionar el planeta mientras sentado en salas de conferencias secas.

La historia de los economistas sobre la política climática óptima sostiene que debemos tomar decisiones para maximizar la utilidad agregada entre nosotros y nuestros nietos (adecuadamente descontados). Bastante justo hasta ahora, pero la historia ignora la posibilidad de que los valores futuros dependan de las elecciones actuales.

Los economistas analizan cómo nuestras elecciones influyen en las existencias de armas y mantequilla de nuestros nietos y, sin embargo, la historia asume que nuestras elecciones no cambian la forma en que nuestros nietos ven los méritos relativos de las armas y la mantequilla, o la mantequilla y los glaciares. Por el contrario, sospecho que las decisiones que tomemos sobre cómo manejar el mundo natural influirán en los valores de las generaciones futuras, tal vez profundamente.

Debido a que es ostensiblemente neutral en cuanto a valores, la perspectiva económica proporciona un ancla vital para formular políticas en un mundo multipolar. Parafraseando a Churchill, se podría decir que esta postura utilitarista es la base más insatisfactoria para la política pública, excepto todas las demás. Acepto este marco para hacer concesiones de política a corto plazo sobre la contaminación del aire o la política fiscal, pero creo que esta maquinaria analítica es mucho menos útil cuando se la presiona para tomar decisiones a escala global casi irreversibles que abarcan siglos.

El marco económico que sustenta la política climática tiene sus raíces en el utilitarismo, la postura ética de que las decisiones correctas son aquellas que maximizan el bienestar colectivo o la "felicidad". A riesgo de simplificar demasiado, surge un problema central con el utilitarismo al equilibrar el bienestar entre los individuos. Un tropo estándar de la filosofía de pregrado es un escenario en el que un grupo de sádicos decide si deben o no torturar a un individuo solitario. Si los sádicos obtienen más placer colectivo (utilidad) al infligir dolor que el dolor que siente la víctima (desutilidad), entonces, bajo la interpretación más ingenua del utilitarismo, la tortura sería la elección éticamente correcta.

La aplicación al cambio climático es simple: si la mayoría obtiene suficiente utilidad, o se beneficia, de la energía barata, entonces puede ser éticamente correcto en un sentido utilitario que contaminen si sus beneficios superan los costos para las víctimas del cambio climático.

La lógica del utilitarismo económico explica y justifica los resultados sociales similares a las elecciones individuales que producen una compensación del riesgo de comportamiento. Una tecnología que reduce el impacto ambiental por unidad de producción puede no lograr reducir la huella ambiental agregada del mundo si la adopción de la tecnología provoca un aumento en el consumo.

El proceso de Haber-Bosch para fabricar fertilizantes nitrogenados artificiales, uno de los inventos más importantes del siglo XX, podría haberse utilizado para intensificar la producción agrícola y así disminuir la huella de la tierra de la agricultura, y puede haber reducido el riesgo a corto plazo de morir de hambre para algunos, pero su efecto a largo plazo fue aumentar la población mundial y la huella ambiental. El deseo humano se expande como un gas para llenar la botella definida por los recursos y la tecnología.

Si funciona, la geoingeniería podría usarse para disminuir la huella ambiental de la humanidad; o podría usarse para aumentar lo que un ecologista podría llamar la capacidad de carga del planeta para nuestra especie, permitiendo una expansión en el consumo global.

Una salida a estas conclusiones utilitaristas implica la atribución de derechos inherentes, alejando la ética de un simple equilibrio de bienestar.

Sin embargo, apelar a los derechos no resuelve los problemas éticos porque uno debe enfrentarse a la pregunta de qué hacer cuando los derechos entran en conflicto. ¿Cómo juzgamos mi “derecho” a disfrutar de la naturaleza ártica frente a su derecho a alimentar a su familia extrayendo carbón? ¿Los osos polares tienen derechos? Y, dado que es fundamental para el problema climático que los beneficios actuales se compensen con los riesgos futuros, existen preguntas obvias sobre cómo pensar en los derechos de las generaciones futuras.

Sospecho que las actitudes hacia la geoingeniería y el cambio climático activan nuestras actitudes personales sobre la tecnología y la naturaleza más de lo que suele reconocerse. Si consideramos solo razones estrictamente utilitarias para la acción climática, entonces es difícil justificar los recortes de emisiones de la magnitud que muchos, incluyéndome a mí, quisieran ver. Del mismo modo, suponiendo que la geoingeniería funcione tan bien como la ciencia

temprana sugiere que lo hace, entonces es difícil evitar la conclusión de que se debe implementar algo de geoingeniería.

Los profesionales que abogan por la acción sobre el cambio climático aceptan como una cuestión de sabiduría común que los argumentos ambientales anticuados para preservar el mundo natural tienen poco poder para conmover al público, que es más efectivo hacer que el cambio climático parezca real y amenazante vinculándolo a temas de interés público inmediato. Los argumentos (supuestamente) más efectivos retratan el clima como un problema de seguridad, un problema alimentario, un problema de agua o incluso una oportunidad para la creación de empleo y la competitividad económica. Estos argumentos no carecen de mérito. Pero mi corazonada es que la movilización de acciones a gran escala requerirá que hablemos directamente sobre el clima como un nuevo tipo de crisis ambiental planetaria, no porque plantea una grave amenaza para nuestro bienestar, pero una crisis, sin embargo, en el futuro de un mundo natural exprimido por la civilización industrial.

El enfoque actual de la defensa del medio ambiente se basa en la suposición de que las personas responderán solo a los argumentos de interés propio. La razón por la que el compromiso de reducir las emisiones ha sido débil, según el argumento, es el simple hecho de que es difícil motivar a las personas a tomar medidas costosas cuando la mayoría de los beneficios de esa acción se distribuyen globalmente y caen más de medio siglo en el futuro. . El interés propio es un motivador poderoso, pero el egoísmo y el pensamiento a corto plazo son una explicación incompleta de la inacción, ya que estas dos tendencias siempre están en juego y, sin embargo, hemos avanzado en otros desafíos que requerían inversión colectiva y pensamiento a largo plazo.

Aumentar la exageración de la catástrofe climática no ha sido efectivo hasta la fecha: la fatiga por desastres se presenta rápidamente, por lo que tal vez sea hora de algo nuevo:

hablemos con franqueza sobre las razones no utilitarias para preservar un mundo natural próspero.

Desde la caza de incendios hasta los cultivos genéticamente modificados, nuestra especie ha pasado milenios utilizando tecnología para alterar el medio ambiente. La geoingeniería se ve con mayor frecuencia como una forma de limitar el impacto de nuestras emisiones de carbono en el clima, pero incluso si la tecnología se usa primero al servicio de limitar los impactos ambientales, dudo que su uso termine allí. Por ejemplo, si me contrataran para maximizar la productividad agrícola global, podría diseñar un clima diferente al actual, uno con una mayor concentración de dióxido de carbono para fomentar el crecimiento de las plantas, en combinación con geoingeniería para limitar las temperaturas excesivas. La geoingeniería otorga a la humanidad nuevos poderes para dar forma al entorno planetario; la historia sugiere que es poco probable que este poder se use solo para limitar los impactos ambientales de otras acciones humanas.

El economista y premio Nobel Tom Schelling identificó la mutabilidad de los objetivos de la geoingeniería en 1982. En un estudio sobre el cambio climático de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, escribió que “el interés en el CO2 puede generar o reforzar un interés duradero en los medios nacionales o internacionales de cambio climático y modificación del clima [geoingeniería]; una vez generado, ese interés puede florecer independientemente de lo que se haga con respecto al CO2 .”59

Si desea dejar a sus bisnietos con una civilización vibrante y proteger más del patrimonio natural del planeta, entonces puede justificar acciones enérgicas para limitar el cambio climático, incluida la geoingeniería. Creo esto a pesar del hecho de que al alterar todos los paisajes del mundo, el cambio climático impulsado por el carbono representa el "fin de la naturaleza", como argumentó Bill McKibben en su libro de 1989 del mismo nombre. Con o sin geoingeniería, es el fin de la naturaleza con 'N' mayúscula, el ideal romántico de la naturaleza completamente separada de la civilización.

Tengo la esperanza de que la gestión deliberada del cambio climático, incluida la geoingeniería, pueda ser el comienzo de un compromiso renovado para construir una civilización próspera que honre su conexión íntima con el mundo natural.

En su raíz, la decisión de reducir las emisiones, o de geoingeniería, o ambas, o ninguna, exige una extensión de nuestra brújula moral para incluir seres distantes de nuestro mundo cotidiano: las generaciones futuras, los pobres distantes y los mundos naturales. Ninguna canasta de arreglos técnicos resolverá el problema del carbono y el clima si la humanidad no puede alcanzar un consenso social aproximado sobre los valores compartidos que impulsan la acción.

¿Deberíamos incluir la ingeniería deliberada a escala planetaria como parte de nuestra caja de herramientas climática? Si es así, ¿cómo deberíamos elegir la combinación de recortes de emisiones, adaptación y geoingeniería que se utilizan para gestionar los riesgos climáticos?

Creo que deberíamos desarrollar la geoingeniería y usarla pronto si puede frenar el cambio climático de manera segura, pero nadie puede extraer respuestas objetivas a estas preguntas de la ciencia. Las respuestas no se basan simplemente en hechos, sino también en los objetivos generales de acción para limitar el cambio climático, objetivos que a su vez dependen de los valores, no de la ciencia.

La geoingeniería a menudo parece una elección triste entre alternativas desagradables.

Como dijo el periodista Eli Kintisch: “Una mala idea cuyo momento ha llegado”. Pero no puedo abrazar por completo ese punto de vista. Es una salida fácil.

Aproximadamente un millón de años después de la invención de las herramientas para cortar piedra, diez mil años después de la agricultura y un siglo después del vuelo de los hermanos Wright, el instinto de la humanidad para construir herramientas en colaboración nos ha brindado la capacidad de manipular nuestro propio genoma y el clima de nuestro planeta. Estas

herramientas se basan en un profundo conocimiento del mundo natural acumulado durante siglos. Este conocimiento fue construido por los esfuerzos de innumerables individuos, todos llenos de errores y motivados por el interés propio, pero cada uno también contribuyó a la acumulación de comprensión. Podemos usar estos poderes para bien o para mal, pero es difícil no deleitarse con estas nuevas herramientas como expresión del esfuerzo humano colaborativo para comprender el mundo natural.

El camino hacia el uso inteligente de la geoingeniería puede requerir que captemos simultáneamente el deleite de nuestras nuevas herramientas junto con la humildad para ver sus límites.

Expresiones de gratitud

Las ideas son un producto inherentemente social. Las ideas que he unido en este libro han surgido de colaboraciones académicas e innumerables conversaciones con amigos, críticos y colegas. Estoy particularmente en deuda con colaboradores y mentores, incluidos Jim Anderson, Jay Apt, Ken Caldeira, Bill Clark, Hadi Dowlatabadi, John Dykema, Steve Hamburg, Tad Homer-Dixon, Jane Long, Doug MacMartin, Ashley Mercer, Juan Moreno- Cruz, Granger Morgan, Andy Parker, Ted Parson, Kate Ricke, John Shepherd, David Victor y Debra Weisenstein. Es un placer trabajar en un tema que genera una fuerte opinión en casi todos, y mi forma de pensar ha sido moldeada por muchas conversaciones casuales con ciudadanos preocupados, desde taxistas hasta escolares.

El texto y sus errores son de mi responsabilidad. Como autor académico nuevo en escribir para una audiencia general, me he beneficiado enormemente de la edición profesional de Deb Chasman y Hal Clifford y de algunos lectores cuidadosos y generosos que han comentado borradores, incluidos Jody Blackwell, Tony Keith, Oliver Morton, Andy Parker, y Daniel Thorp.

NOTAS

1. Cheryl Jones. “El clima no tiene la culpa de la extinción de los grandes animales de Australia”. Nature, 23 de enero de 2010 www.nature.com/news/2010/100123/full/news.2010.30.html; y Gilford H. Miller, et al. "Extinción del pleistoceno de Genyornis newtoni: impacto humano en la megafauna australiana".

Ciencia, 283: 205-208 (1999). doi:10.1126/ciencia.283.5399.205.

2. Expuse este argumento con mayor profundidad en mi testimonio ante el Congreso,

véase:
http://science.house.gov/sites/republicans.science.house.gov/files/documents/hearings/020410_Keith. pdf

3. Intento mantener un muro entre Carbon Engineering (www.carbonengineering.com) y mi trabajo académico. No me involucro en evaluaciones académicas de captura de aire ni hablo de ello en público a menos que esté claramente identificado como representante de la industria y no como académico, y en tales eventos, me enfoco en el trabajo de Carbon Engineering y evito ofrecer comentarios generales. comentarios “académicos” sobre tecnología o política pública.

4. Estos números están redondeados por simplicidad. La cantidad de azufre necesaria para compensar una determinada cantidad de forzamiento radiativo tiene una incertidumbre de al menos el 30 %. Tenga en cuenta también que la tasa de crecimiento de los gases de efecto invernadero y su forzamiento radiativo asociado depende, por supuesto, de las emisiones futuras.

5. Estas ideas específicas se originaron con un estudio de Aurora Flight Science Corporation que ayudé a iniciar y administrar. Ver: Justin McClellan, David W. Keith y Jay Apt. "Análisis de costos de los sistemas de entrega de modificación del albedo estratosférico". Cartas de investigación ambiental, 7:034019 (2012). doi:10.1088/1748-9326/7/3/034019.

6. Juan Moreno-Cruz et al.. “Un modelo simple para dar cuenta de las desigualdades regionales en la efectividad del manejo de la radiación solar”. Cambio Climático, 110:649-66 (2012). doi: 10.1007/s10584-011-0103-z. Disponible en: www.keith.seas.harvard.edu/ geo.html. Katherine Ricke et al. “Respuesta climática regional a la gestión de la radiación solar”. Nature Geoscience, 3:537-541 (2010). doi:10.1038/ngeo915. Douglas G. MacMartin et al. "Gestión de

compensaciones en geoingeniería a través de la elección óptima de forzamiento radiativo no uniforme". Naturaleza Cambio Climático, (2012). doi: 10.1038/NCLIMATE1722.

7. “Una vez que llegas al punto en términos de cambios climáticos que sientes que tienes que usarlo, entonces tienes que usar [SRM] para siempre”, Pierrehumbert citado en: David Rotman. “Un plan barato y fácil para detener el calentamiento global”. Revisión de tecnología. Febrero de 2013. www.technologyreview.com/featuredstory/511016/a-cheap-and-easy-plan-to-stop-global-warming/

8. Jane Mayer. “Llevándolo a la calle”. The New Yorker, 28 de noviembre de 2011. www.newyorker.com/talk/comment/2011/11/28/111128taco_talk_mayer.

9. La humanidad controla sus emisiones industriales, pero la concentración de dióxido de carbono depende no solo de nuestras emisiones sino también de cómo se intercambia el carbono con los suelos, los bosques y el océano. Cada uno de estos flujos de carbono está influenciado por actividades humanas distintas de la combustión de combustibles fósiles; cada uno tiene su propia dinámica e incertidumbres. En general, esta incertidumbre en el ciclo del carbono es relativamente pequeña.

contribuyente a la incertidumbre total al vincular las emisiones con el riesgo climático, pero todas las incertidumbres se multiplican arriba.

10. La Unidad de Inteligencia de The Economist. "Rock Steady: un informe especial sobre la demanda de carbón". The Economist Intelligence Unit, mayo de 2013. www.eiuresources.com/Coaldemand2013.

11. Un aumento en el dióxido de carbono calienta el clima y eso, a su vez, altera el flujo de carbono dentro o fuera de la atmósfera a través de procesos tan diversos como la velocidad a la que se descompone la materia orgánica (la madera más caliente se pudre más rápido) y la solubilidad del carbono. dióxido en el agua del océano (el agua más caliente contiene menos dióxido de carbono). En el sistema de interacción completo, uno no puede separar inequívocamente la causa del efecto o la fuerza de la respuesta. Cuando hablamos de

forzamiento del clima por el dióxido de carbono, estamos utilizando un truco analítico, aunque es crucial para comprender el cambio climático. Estamos definiendo la respuesta del clima al forzamiento del dióxido de carbono como el cambio que ocurriría si pudiéramos controlar la cantidad de dióxido de carbono en el aire mientras permitimos que todo lo demás fluya libremente. Tales experimentos, por supuesto, se realizan fácilmente en modelos de computadora, y nuestra experiencia con esos modelos, a su vez, da forma al lenguaje y al pensamiento de la ciencia atmosférica.

12. Ken es un niño prodigio y un poco malo de la ciencia del clima, un ex activista antinuclear que ayudó a organizar una gran manifestación en Nueva York en 1982 contra la acumulación de armas de Reagan a la que asistí recién salido de la escuela secundaria. Ken y yo ahora trabajamos juntos en geoingeniería, y los tres servimos como asesores de Bill Gates en cuestiones de energía y medio ambiente.

13. En ese momento, tanto Ken Caldeira como Lowell Wood trabajaban en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore. El primer artículo de Ken sobre geoingeniería es: Bala Govindasamy y Ken Caldeira.

"Geoingeniería del balance de radiación de la Tierra para mitigar el cambio climático inducido por CO2". Cartas de revisión geofísica, 27: 2141-2144 (2000). doi:10.1029/1999GL006086.

14. Primero sumamos el error de precipitación para todas las regiones ponderando las regiones por población para que una región con el doble de población cuente el doble en el promedio; luego, ajustamos la cantidad de geoingeniería solar para minimizar este error total. Ver nota al pie 6.

15. Alan Robock, Luke Oman y Georgiy L. Stenchikov. “Respuestas climáticas regionales a la geoingeniería con inyecciones de SO2 tropical y ártico”. Revista de Investigación Geofísica: Atmósferas, 113:D162008 (2008). doi:10.1029/2008JD010050.

16. Al 11 de abril de 2012, una búsqueda en Google de geoingeniería y monzones arroja 0,88 millones de resultados, mientras que una búsqueda de geoingeniería arroja 1,56 millones.

17. Arun Gupta. “¿Geoingeniería del planeta? Reconstrucción corporativa de la atmósfera de la Tierra”. Z Magazine, 23.6 (2010) <http://www.zcommunications.org/geoengineering-the-planet-by-arun gupta>.

18. Cambio Climático 2007: Grupo de Trabajo II: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. Consulte la sección 19.3.6 “Eventos extremos” en www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ ch19s19-3-6.html.

19. Ver figura S5 en: J. Pongratz, DB Lobell, L. Cao y K. Caldeira. "Rendimiento de cultivos en un clima de geoingeniería". Naturaleza Cambio Climático. 2:101–105 (2012). doi:10.1038/nclimate1373.

20. Alan Robock et al. “¿Una prueba de geoingeniería?” Ciencias. 327:530-531 (2010). doi:10.1126/ ciencia.1186237

21. John Shepherd, et al. Geoingeniería del clima–Ciencia, gobernanza e incertidumbre. La Royal Society, 2009 http:// royalsociety.org/uploadedFiles/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf.

22. Es un caso de vida que protege la vida, el desarrollo de la vida terrestre no fue posible hasta que los organismos fotosintéticos produjeron suficiente oxígeno para producir una capa de ozono.

23. Una molécula de ozono tiene tres átomos de oxígeno. Se forma agregando un oxígeno "impar" al par de átomos que forman una molécula de oxígeno regular. Una lección central de la ciencia ambiental durante el último medio siglo es que si uno inventa una nueva sustancia química, debe comprender el camino completo de sus productos de descomposición en el medio ambiente. Si los productos químicos no se descomponen rápidamente en el medio ambiente, pueden acumularse y alcanzar niveles peligrosos en lugares inesperados, como fue el caso de los residuos de pesticidas que se acumularon en los tejidos grasos.

24. Simone Tilmes, et al. “Impacto de los aerosoles de geoingeniería en la troposfera y la estratosfera”.

Revista de Investigación Geofísica, 114:D12305 (2009). doi:10.1029/2008JD011420.

25. La Organización Mundial de la Salud estima que la contaminación del aire exterior provoca 1,3 millones de muertes al año en todo el mundo. Ver: www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/index.html

26. Para una visión reflexiva y sucinta de cómo la tecnología difiere de la ciencia, ver: W. Brian Arthur.

La naturaleza de la tecnología: qué es y cómo evoluciona. Londres: Penguin Group, 2009.

27. El “agujero de ozono” es el agotamiento muy rápido del ozono en la estratosfera polar norte y sur que surge de circunstancias particulares de la estratosfera polar (eliminación de óxidos de nitrógeno), además del mecanismo de Molina y Rowland.

28. Douglas MacMynowski et al. “¿Podemos probar la geoingeniería?” Energía y Ciencias Ambientales, 4: 5044-5052 (2011). doi: 10.1039/c1ee01256h

29. Wallace S. Broecker. "¿Sorpresas desagradables en el invernadero?" Naturaleza, 328: 123-126 (1987). doi:10.1038/328123a0.

30. Jeffrey R. Pierce, et al. “Formación eficiente de aerosoles estratosféricos para geoingeniería mediante la emisión de vapor condensable desde aeronaves”. Cartas de investigación geofísica, 37:L18805 (2010). doi:10.1029/2010GL043975. Disponible en: www.keith.seas.harvard.edu/geo.html.

31. Crutzen, PJ "Mejora del albedo mediante inyecciones de azufre estratosférico: ¿una contribución para resolver un dilema de política?" Cambio Climático, 77:211-219 (2006). doi:10.1007/s10584-006-9101-y.

32. Si la vida útil es diez veces más corta, se necesitarán diez veces más aerosoles para producir el mismo forzamiento radiativo, por lo que los costes y algunos efectos secundarios, como la contaminación del aire, serán diez veces peores.

33. Estas estimaciones se basan en un estudio de consultoría realizado por una empresa de consultoría aeroespacial con experiencia en el desarrollo de aeronaves de gran altitud (ver McClellan et al. citado en la nota 5). Veinte Gulfstream C-37A arrojan alrededor de 0,45 millones de toneladas por año a la estratosfera. Suponiendo carga útil de azufre con conversión a SO_3 en

vuelo y usando los resultados de Pierce et al. (citado en la nota 26) esto da alrededor de 0,4 Wm-2.

34. El esquema de inyección directa de vapor (nota 26) que propusimos como una solución parcial para el problema de las gotas grandes probablemente no sería posible utilizando una cantidad razonable de mangueras, por lo que se puede argumentar que el

Es probable que el sistema de mangueras no funcione bien para la geoingeniería de aerosoles de sulfato a gran escala.

35. Los cambios dramáticos en el clima o la tecnología implementada toman décadas. Si bien los impactos climáticos de nuestras emisiones se extienden por milenios en el futuro, navegar el desafío del carbono y el clima es un trabajo para este siglo.

36. E. Teller, L. Wood y R. Hyde. Calentamiento global y edades de hielo: I. Perspectivas para la modulación del cambio global basada en la física. Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, 1997. Disponible en: http://dge.stanford.edu/labs/caldeiralab/Caldeira%20downloads/Teller_etal_LLNL231636_1997.pdf.

Para obtener un resumen del control del clima y la participación militar vinculada a la geoingeniería, consulte: David W.

Keith. "Geoingeniería del clima: historia y perspectivas". Revisión Anual de Energía y Medio Ambiente, 25: 245-284 (2000). doi:10.1146/annurev.energy.25.1.245. Disponible en: www.keith.seas.harvard.edu/geo.html.

37. Las moléculas en un gas caliente se mueven más rápido que cuando el gas está frío; esta es la esencia de lo que es el calor a nivel molecular.

38. Los materiales nanofabricados simples se pueden hacer a bajo costo, pero las estructuras que propongo son más complejas y no sé si se pueden hacer a un costo suficientemente bajo, ver: David W. Keith.

"Levitación fotoforética de aerosoles diseñados para geoingeniería". Actas de la Academia Nacional de Ciencias, 107: 16428-16431 (2010). doi:10.1073/pnas.1009519107.

39. H. Wang, PJ Rasch y G. Feingold. "Manipulación de la cantidad de nubes de estratocúmulos marinos y el albedo: un estudio de modelado de procesos de las interacciones aerosol-nube-precipitación en respuesta a la inyección de núcleos de condensación de nubes". Química y Física Atmosférica, 11:4237-4249 (2011). doi:10.5194/acp-11-4237-2011.

40. Un estado de bola de nieve podría desencadenarse por un 8% de reducción de la luz solar durante un siglo, esto es aproximadamente cuatro veces la reducción de la luz solar que a menudo se considera para la geoingeniería. Véase J. Yang, WR Peltier y Y. Hu. "La iniciación de los climas modernos de Tierra Bola de Nieve blanda y dura en CCSM4". Clima del Pasado. 8:1-29 (2012). doi:10.5194/cpd-8-1-2012.

41. Imagina la forma en que el Jetstream se mueve hacia arriba y hacia abajo a lo largo de las latitudes medias, si empujas el Jetstream hacia el norte en un lugar, se moverá hacia el sur en otro lugar.

42. www.srmgi.org/about-srmgi

43. Las pruebas que se ofrecen para respaldar esta opinión a menudo son poco más que la convicción de que las estelas de las aeronaves persisten más de lo natural. Wikipedia proporciona una buena descripción general de la teoría de la conspiración, http://en.wikipedia.org/wiki/ Chemtrail_conspiracy_theory. Hay muchos buenos sitios web dedicados a desacreditar las estelas químicas, incluido http:// conspiracies.skepticproject.com/articles/chemtrails/ y http://contrailscience.com.

44. La encuesta fue realizada por mi estudiante de doctorado Ashley Mercer y administrada por firmas de encuestas que garantizan muestras representativas. Encuestamos a unas 3000 personas en Canadá, Gran Bretaña y EE. UU. en 2010. Consulte AM Mercer, DW Keith y JD Sharp. “Entendimiento público de la gestión de la radiación solar”, Environmental Research Letters, 6:044006 (2011). doi:10.1088/1748-9326/6/4/044006.

45. Clive Hamilton entrevistado por Amy Goodman de Democracy Now, 20 de mayo de 2013, ver: http://m.democracynow.org/ stories/13653 . La cita completa es “Ellos lo ven como—los conservadores lo ven como una reivindicación del sistema. Lo ven: ven la geoingeniería como una forma de proteger el sistema,

de preservar el sistema político económico, mientras que otros dicen que lo más probable es el sistema político y económico, y eso es lo que tenemos que cambiar”.

46. Que yo sepa, el primer uso del riesgo moral junto con la geoingeniería fue en el año 2000 en mi artículo “Geoingeniería del clima: historia y perspectivas”, citado en la nota final 32.

47. Ian Walker. "Conductores que adelantan a ciclistas: datos objetivos sobre los efectos de la posición de conducción, el uso del casco, el tipo de vehículo y el género aparente". Análisis y prevención de accidentes, 39: 417–425 (2007). doi:10.1016/j.aap.2006.08.010. La entrada de Wikipedia sobre Compensación de riesgos sirve como una buena introducción al tema general, y un artículo temprano clásico es Gerald JS Wilde. "La teoría de la homeostasis del riesgo: implicaciones para la seguridad y la salud". Análisis de riesgos, 2: 209–225 (1982). doi:10.1111/j.1539-6924.1982.tb01384.x.

48. Centro de Política Bipartidista. Grupo de Trabajo sobre Investigación de Remediación Climática. Washington DC, EE. UU., 2011 http://bipartisanpolicy.org/library/report/task-force-climate-remediation-research; Iniciativa de gobernanza de la gestión de la radiación solar, Gestión de la radiación solar: la gobernanza de la investigación, Buckinghamshire, Reino Unido, 2011. www.srmgi.org/report.

49. Juan B. Moreno-Cruz y David W. Keith. “Política climática bajo incertidumbre: un caso para la geoingeniería”, Cambio climático, (2012). doi:10.1007/s10584-012-0487-4. Agregamos la geoingeniería a un tratamiento completamente estándar de la incertidumbre en la política climática que equilibra los costos actuales (recortes de emisiones) con los beneficios futuros (menos impactos climáticos) frente a la incertidumbre sobre los impactos climáticos y la geoingeniería. Los resultados numéricos específicos dependen de nuestras suposiciones (suposiciones), pero la dirección de la conclusión es fuerte: debido a que sirve para limitar los resultados en el peor de los casos, la geoingeniería puede desempeñar un papel valioso para

limitar el costo general del cambio climático incluso cuando lo asumimos. tiene riesgos significativos y una eficacia limitada.

50. La fuente más importante es el estudio de la EPA ordenado por el Congreso, Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (1997), “The Benefits and Costs of the Clean Air Act, 1970 to 1990” disponible en http://www.epa.gov/

cleanairactbenefits/ . El estudio encontró que los beneficios económicos, como la reducción de la hospitalización, eran aproximadamente diez veces mayores que los costos de reducir las emisiones. A pesar de esto, muchas tecnologías rentables de contaminación del aire no se han implementado en los EE. UU. y en todo el mundo, un gran fracaso de la política pública. Uno tiene que preguntarse cómo podemos esperar avanzar en el cambio climático cuando no podemos controlar la contaminación del aire.

51. Los pobres y los ricos ahora están, por supuesto, entremezclados, ya que los ricos incluyen a los cientos de millones que tienen niveles de vida del mundo rico y emisiones de carbono en países pobres como China, mientras que al mismo tiempo hay comunidades pobres en el mundo rico que están vinculados a la pesca o la agricultura marginales que pueden soportar cargas climáticas significativas.

52. La declaración de misión del Grupo ETC dice: "El Grupo ETC trabaja para abordar los problemas socioeconómicos y ecológicos relacionados con las nuevas tecnologías que podrían tener un impacto en las personas más pobres y vulnerables del mundo". Consulte http://www.etcgroup.org. El grupo ETC argumenta que la geoingeniería es especulación. Quizás la cita única más fuerte en los sitios web de ETC es de John Vidal de The Guardian, quien dijo de los autores del informe del Bipartisan Policy Center (citado en la nota 44) “esta coalición de expertos estadounidenses es un grupo de personas que huelen un gran futuro potencial. beneficios para sus instituciones y empresas en geoingeniería”.

53. Naomi Klein, “Geoengineering: Testing the Waters”, New York Times, 27 de octubre de 2012. www.nytimes.com/2012/10/28/opinion/sunday/geoengineering-testing-the-waters.html?.

54. Naomi Klein, “Capitalism vs. the Climate”, The Nation, 28 de noviembre de 2011. www.thenation.com/article/164497/capitalism-vs-climate.

55. Christopher L. Weber y H. Scott Matthews. “Food-Miles and the Relative Climate Impacts of Food Choices

in the United States,” Environmental Science and Technology, 42:3508–3513 (2008). doi:10.1021/ es702969f.

56. Clive Hamilton. “La camarilla que está tratando de enmarcar el debate global sobre geoingeniería”,

The Guardian, 5 de diciembre de 2011. www.guardian.co.uk/environment/2011/dec/05/clique-geoengineering debate.

57. Moreno-Cruz y Keith citados en la nota 45; y Ken Caldeira y David W. Keith. "La necesidad de investigación en ingeniería climática". Temas en Ciencia y Tecnología. 27: 57-62 (2010). www.issues.org/ 27.1/caldeira.html.

58. David W. Keith y Andy Parker. “El destino de un planeta diseñado”. Scientific American, 308:34-36 (2013). doi:10.1038/cientificamerican0113-34.

59. Junta de Ciencias Atmosféricas y Clima, Comisión de Ciencias Físicas, Matemáticas y Recursos, Consejo Nacional de Investigación “Cambio climático: Informe del Comité de Evaluación de Dióxido de Carbono”, National Academy Press, Washington, DC (1983).

Sobre el Autor

David Keith es profesor de Políticas Públicas en la Escuela Kennedy y Profesor Gordon McKay de Física Aplicada en la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad de Harvard. Ha trabajado cerca de la interfaz entre la ciencia climática, la tecnología energética y las políticas públicas durante veinte años. Obtuvo el primer premio en el examen del premio nacional de física de Canadá, ganó el premio del MIT a la excelencia en física experimental y fue incluido como uno de los Héroes del Medio Ambiente 2009 de la revista TIME .

Libros de revisión de Boston

Boston Review Books es un sello de Boston Review, una publicación bimensual revista de ideas. La serie de libros, como la revista, cubre una gran cantidad de tierra. Pero unas pocas premisas lo unen todo: que la democracia depende de discusión pública; que a veces comprender significa profundizar; en que las grandes desigualdades son injustas; y que la imaginación humana se libera de ordenadas categorías políticas. Visite bostonreview.net para más información.

El fin de lo salvaje .

Dios y el Estado del Bienestar

Hacer que la ayuda funcione

La historia de lo cruel e inusual

El cine y la aventura moral de la vida .

El camino a la democracia en Irán

Por qué es importante el desarme nuclear

Raza, encarcelamiento y valores estadounidenses .

Los hombres de mi vida

¿El turno de África?

Inventando la historia americana

Después de la crisis de la mediana edad de Estados Unidos

Por qué cooperamos

Tomando la economía en serio

Estado de derecho, desgobierno de los hombres

Los inmigrantes y el derecho a permanecer .

Preparándonos para el Cambio Climático . .

El lugar del gobierno en el mercado

Guerras fronterizas

Culpar al Islam .

Volver a Pleno Empleo

Compras para el bien

Lo que sabemos sobre el cambio climático, 2ª ed.

Ocupa el futuro, .

Dar a los niños una oportunidad justa

El dilema de Siria